

4-7-2011

Estudio del movimiento de bloques por crecientes e impactos sobre estructuras en el Río Negro Cundinamarca, sector Paraíso Km 5+000

Jeyder Martínez Aranzales
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil



Part of the [Civil Engineering Commons](#), and the [Construction Engineering and Management Commons](#)

Citación recomendada

Martínez Aranzales, J. (2011). Estudio del movimiento de bloques por crecientes e impactos sobre estructuras en el Río Negro Cundinamarca, sector Paraíso Km 5+000. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/242

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE BLOQUES POR CRECIENTES E IMPACTOS
SOBRE ESTRUCTURAS EN EL RÍO NEGRO CUNDINAMARCA, SECTOR
“PARAÍSO” KM 5+000**

JEYDER MARTÍNEZ ARANZALES

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2.011**

**ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE BLOQUES POR CRECIENTES E IMPACTOS
SOBRE ESTRUCTURAS EN EL RÍO NEGRO CUNDINAMARCA, SECTOR
“PARAÍSO” KM 5+000**

JEYDER MARTÍNEZ ARANZALES

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de:
INGENIERO CIVIL**

**Director:
ING. LUIS EFRÉN AYALA ROJAS**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2.011**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 7 de abril de 2.011

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, les agradezco que hayan sabido crear y mantener mi inquietud, mi ambición y mis sueños.

A ellos gracias por darme una profesión para mi futuro y por siempre creer en mí a pesar de todas las dificultades. Gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante.

Al ingeniero Luis Efrén Ayala Rojas, por poner al servicio de este proyecto todos sus conocimientos y ser director del mismo.

Al ingeniero Miguel Ángel Barragán Ochica y a Martha Lucia Tovar, por la ayuda en el Laboratorio de Hidráulica para realizar las practicas de este proyecto.

A todo el grupo de docentes de la Universidad de La Salle que hicieron de mí una persona íntegra a través de sus conocimientos impartidos a lo largo de la formación profesional.

A todas los que hicieron posible alcanzar esta meta, GRACIAS.

DEDICATORIA

La presente tesis y el título de ingeniero civil se los dedico a mi familia, quienes, gracias a sus consejos y palabras de aliento me hicieron crecer como persona. Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo en todo momento.

A mi padre por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre. A mi madre por hacer de mi una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor. A mi novia por su constante aliento y apoyo para que siguiera adelante.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD DE LA SALLE

Rector : HNO. CARLOS GABRIEL GÓMEZ RESTREPO

Vice-Rector Académico : HNO. FABIO CORONADO PADILLA

Vice-Rector Administrativo : DR. EDUARDO ÁNGEL REYES

Vice-Rector de Promoción y
Desarrollo Humano : HNO. FRANK L. RAMOS BAQUERO

Decano Facultad de Ingeniería : ING. CAMILO H. GUAQUETA RODRÍGUEZ

Director Programa de
Ingeniería Civil : ING. HÉCTOR VEGA GARZÓN

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROBLEMA.....	3
1.1. TÍTULO	3
1.2. LÍNEA - GRUPO - CENTRO	3
2. RESUMEN DEL PROYECTO	4
3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	6
3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
3.3. JUSTIFICACIÓN	7
3.4. OBJETIVOS	8
3.4.1. Objetivo general	8
3.4.2. Objetivos específicos	8
4. MARCO REFERENCIAL.....	10
4.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS	10
4.2. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL	19
4.2.1. Parámetros físicos de la sección transversal	19
4.2.2. Parámetros adimensionales.....	20
4.2.3. Erosión	23
4.2.4. Erosionabilidad.....	26
4.2.5. Obras hidráulicas o infraestructuras hidráulicas.....	28

4.2.6.	Modelo físico reducido	35
4.2.7.	Fuerzas de arrastre o de la resistencia universal	36
4.3.	MARCO NORMATIVO	39
4.4.	MARCO CONTEXTUAL.....	39
5.	METODOLOGÍA	44
5.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	46
5.2.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	46
5.2.1.	Fase 1. Estudios previos - contextualización	46
5.2.2.	Fase 2. Construcción del modelo hidráulico reducido	47
5.2.3.	Fase 3. Experimentación.....	53
5.2.4.	Fase 4. Análisis y publicación de resultados.....	54
5.3.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES	54
5.4.	RECURSOS UTILIZADOS.....	57
5.5.	ALCANCE	58
5.6.	LIMITACIÓN.....	58
6.	TRABAJO INGENIERIL	59
6.1.	ESCALAS GEOMÉTRICAS	59
6.2.	CAUDAL DEL MODELO	61
6.3.	ESCALA DEL PESO DE LAS PARTÍCULAS	64
6.4.	LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA	65
6.5.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA REDUCIDA	65
6.6.	MATERIAL	68

6.7.	ESTRUCTURAS	70
6.7.1.	Muro de contención.....	70
6.7.2.	Muro tipo gavión.....	71
6.7.3.	Espolones	73
6.8.	VOLUMEN Y DENSIDAD DE LAS ROCAS	74
6.9.	AFORO DEL CAUDAL DE ENTRADA.....	75
6.10.	PRUEBAS DE LABORATORIO	77
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	80
7.1.	RESULTADOS.....	80
7.1.1.	Caracterización de las partículas	80
7.1.2.	Velocidad media de cada partícula	82
7.1.3.	Fuerza de impacto.....	83
7.1.4.	Fuerza de arrastre.....	87
7.1.5.	Resistencia a la compresión de las estructuras	89
7.2.	RESULTADOS ESPERADOS VS. RESULTADOS OBTENIDOS.....	90
7.3.	PORCENTAJE DE ERROR	93
7.4.	RECOMENDACIONES	93
	CONCLUSIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA.....	97

LISTADO DE IMÁGENES

Imagen 1.	Representación esquemática de las etapas de un río en áreas de montaña tropical.	12
Imagen 2.	Tipos principales de cauces viejos.....	13
Imagen 3.	Procesos de erosión y sedimentación en ríos meándricos.	15
Imagen 4.	Clasificación de los meandros.	16
Imagen 5.	Distribución de velocidades en la sección del cauce de un río	18
Imagen 6.	Velocidades, corrientes secundarias y fuerzas de tracción sobre el cauce	18
Imagen 7.	Malla de un gavión.....	29
Imagen 8.	Características de una protección con gaviones, combinando sus tres modalidades.....	30
Imagen 9.	Esquema de la erosión generada por el flujo en los espolones.	32
Imagen 10.	Esquema del colapso de estructuras por socavación.	34
Imagen 11.	Diagrama de flujo del proceso de este proyecto.	56
Imagen 12.	Esquema tridimensional del muro de contención.....	70
Imagen 13.	Esquema tridimensional del muro tipo gavión.....	72
Imagen 14.	Esquema tridimensional de un espolón.	73
Imagen 15.	Sección del canal completo para el aforo volumétrico.	75
Imagen 16.	Secciones del canal para el aforo volumétrico.....	76
Imagen 17.	Secuencia de toma de datos para la estructura muro.	78

Imagen 18. Secuencia de toma de datos para la estructura gavión.....78

Imagen 19. Secuencia de toma de datos para la estructura espolones.79

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1.	Estado actual de la estructura de contención en el tramo de estudio en el Rio Negro.	44
Fotografía 2.	Margen derecha del rio en el tramo de estudio de Rio Negro.....	45
Fotografía 3.	Cauce del Rio Negro.	45
Fotografía 4.	Modelo de poliestireno.....	66
Fotografía 5.	Impermeabilizado del modelo.	66
Fotografía 6.	Modelo impermeabilizado con sikafill.	67
Fotografía 7.	Modelo introducido y pegado en el canal.	67
Fotografía 8.	Lugar del conteo de rocas.	69
Fotografía 9.	Conteo de las rocas y sus tamaños.	69
Fotografía 10.	Muro de contención instalado en el modelo escalado.	71
Fotografía 11.	Muro tipo gavión instalado en el modelo escalado.	72
Fotografía 12.	Espolones instalados en el modelo escalado.	73
Fotografía 13.	Rocas seleccionadas aleatoriamente.	80
Fotografía 14.	Roca en desplazamiento por el modelo para los espolones.....	82
Fotografía 15.	Secuencia de impacto de una roca en el muro de contención. ...	86
Fotografía 16.	Rocas en conjunto impactando contra los espolones.....	86
Fotografía 17.	Estructuras falladas a compresión.....	89
Fotografía 18.	Secuencia de falla a compresión.	90

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.	Velocidad de arrastre para distintas condiciones del agua (m/s).....	26
Tabla 2.	Normatividad	39
Tabla 3.	Registro fotográfico del proceso de modelado físico.	50
Tabla 4.	Tamaño y porcentaje de rocas de gran tamaño en el área de estudio. .	68
Tabla 5.	Volumen calculado para cada roca.	74
Tabla 6.	Densidad calculada para cada roca.	75
Tabla 7.	Caudal de entrada.	77
Tabla 8.	Características de las rocas analizadas.	81
Tabla 9.	Velocidad promedio de cada partícula.	83
Tabla 10.	Fuerzas de impacto en el muro de contención.....	85
Tabla 11.	Fuerzas de impacto en el muro tipo gavión.....	85
Tabla 12.	Fuerzas de impacto en los espolones.	86
Tabla 13.	Fuerzas de arrastre en el muro.	87
Tabla 14.	Fuerzas de arrastre en el muro tipo gavión.....	88
Tabla 15.	Fuerzas de arrastre en los espolones.	88
Tabla 16.	Resistencia a la compresión de las estructuras analizadas.	89
Tabla 17.	Presiones de impacto de las partículas en el muro de contención.....	91
Tabla 18.	Presiones de impacto de las partículas en el muro tipo gavión.....	92
Tabla 19.	Presiones de impacto de las partículas en los espolones.	92
Tabla 20.	Error absoluto de las mediciones por estructura.	93

LISTADO DE ANEXOS

- Anexo 1.** CURVA HIPSOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO
- Anexo 2.** MAPA DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA CON EL ÁREA DE ESTUDIO
- Anexo 3.** CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES
- Anexo 4.** COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN
- Anexo 5.** ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA ZONA
- Anexo 6.** LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA AFECTADA
- Anexo 7.** GRANULOMETRÍA DEL SECTOR DE ESTUDIO
- Anexo 8.** CD REGISTRO FOTOGRÁFICO Y VIDEOS

INTRODUCCIÓN

El agua y su influencia en la vida cotidiana hacen necesaria la búsqueda de soluciones a los problemas que afectan las obras de ingeniería. A su vez, existen otras secuelas que no se deben ignorar y que requieren un estudio dedicado por parte de los ingenieros civiles especializados en las áreas que enmarcan el tema del agua, como lo son la Hidrología, la Hidráulica general, el transporte de sedimentos y la Geomorfología, entre otras, así como ciencias que acopladas satisfacen los principios de la Hidráulica fluvial. Existen diferentes maneras de analizar y comprender los problemas ocasionados por el movimiento en bloques, entre ellos, el deterioro de las estructuras construidas en los ríos y en las márgenes de los mismos; aun así, debido a la complejidad de este fenómeno y de las variables que influyen en él, la gran mayoría de análisis son puntuales y descritos con ecuaciones empíricas, deducidas a partir de observaciones directas en los lugares conducentes a movimiento en bloques, en las estructuras con problemas y por medio de modelos tanto físicos como matemáticos. De tal manera, sólo se obtiene una aproximación a la realidad del fenómeno, y no deben considerarse como soluciones generales y mucho menos exactas.

La construcción de una obra civil en medio de cuerpos de agua y específicamente en ríos, su correcto funcionamiento y la seguridad de las mismas se logran mediante el conocimiento de sus problemas. Pero la ingeniería aún no ha logrado

plantear una solución definitiva para estos problemas, teniendo en cuenta que es muy difícil conocer cuál será la influencia y la afectación de esta estructura en el ambiente y viceversa, con el paso del tiempo. Será entonces necesario garantizar el balance del cuerpo de agua sin afectarlo y protegiendo la estructura.

En este proyecto, se analizarán las consecuencias e impactos generados a las estructuras localizadas en el km 5+000 del Río Negro, en el sector denominado Paraíso, área rural del municipio de Pacho, departamento de Cundinamarca. Esta investigación pretende brindar un aporte a la generación de soluciones para la comprensión del fenómeno de movimiento de bloques y de las consecuencias que éste tiene sobre las estructuras de contención; de igual manera, establecer un indicio preliminar a la determinación de la estructura más adecuada para mitigar este fenómeno. Al mismo tiempo, esta investigación permitirá continuar ampliando el conocimiento de la interacción agua-estructura y da pie para evitar que futuras estructuras del mismo tipo colapsen y generen daños a las comunidades vecinas.

1. EL PROBLEMA

Debido al deterioro constante de las estructuras se hace necesario el estudio del impacto de bloques en el sector denominado paraíso en el municipio de Pacho, departamento de Cundinamarca.

1.1. TÍTULO

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE BLOQUES POR CRECIENTES E IMPACTOS SOBRE ESTRUCTURAS EN EL RÍO NEGRO CUNDINAMARCA, SECTOR “PARAÍSO” KM 5+000.

1.2. LÍNEA - GRUPO - CENTRO

El proyecto de investigación desarrollado corresponde a la línea de eventos naturales y materiales de obras civiles, del grupo “CIROC - Centro de Investigación en Riesgo de Obras Civiles”, según las líneas de investigación establecidas por el programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle.

2. RESUMEN DEL PROYECTO

El sector de estudio está ubicado en el kilómetro 5+000 de la vía entre los municipios de Pacho y La Palma los cuales se hallan en el departamento de Cundinamarca, en donde se encuentran ciertas estructuras construidas con el fin de reducir el movimiento de bloques producida por el flujo del Río Negro y evitar el deterioro a la vía en mención. La vía y las estructuras arriba mencionadas, se han visto afectadas por los fenómenos a estudiar en este proyecto, afectando a las comunidades que habitan en el área de influencia, debido al aumento en los tiempos de traslado y el deterioro de las propiedades públicas y privadas existentes a lo largo del trayecto.

Teniendo en cuenta que las obras que se han realizado en la vía (rehabilitación de la vía, obras de contención y obras de arte) no han dado los resultados esperados, ni han sido una solución definitiva para el problema, lo cual se ve reflejado en la economía de ambas comunidades, se hace necesario crear una representación del escenario en cuestión que simule las condiciones reales, y que en conjunto con la observación directa, permitan probar y determinar cuál de las diferentes estructuras de disipación de energía es la más adecuada.

A lo largo de la vía se han construido diversas estructuras para la disipación de energía y la reducción de la socavación producida por el flujo del Río Negro.

Dichas obras de control han reducido el deterioro de la vía pero no en la magnitud esperada. Varios sistemas combinados entre muros de concreto, gaviones y geotextiles, entre otros, han sido implementados pero no han sido una solución radical y definitiva. Con el presente estudio de movimiento de bloques se pretende encontrar una estructura de disipación más eficiente y que permita el ahorro de dinero usado en reparaciones y mitigaciones temporales.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De acuerdo al daño presentado en las estructuras, se estudiará el movimiento de bloques como posibles causas del deterioro de la vía y sus estructuras de protección.

3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el sector conocido como paraíso ubicado en la vía que de Pacho conduce a La Palma -Cundinamarca- se encuentran muros de contención con el fin de evitar los daños que ocasionan las crecientes en la calzada, la función de estos es evitar derrumbes que se presentan en cercanía a la vía, pero estas estructuras están siendo poco eficientes en el control de dichos deslizamientos y no controlan los impactos de los bloques, siendo de alto costo su construcción y solo se pueden hacer en épocas de verano, incrementando más la problemática; la vía se encuentra construida en un caño junto a la margen del río, por ende pretendemos estudiar el movimiento de bloques para determinar la afectación que ocasiona el deterioro de estas estructuras y generan que posteriormente queden inservibles en cuanto al propósito para el cual se diseñaron.

3.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es la estructura más conveniente para la disipación de energía y el control de los efectos del movimiento de bloques, teniendo en cuenta las características de flujo (dirección y velocidad) en el Río Negro km 5+000?

3.3. JUSTIFICACIÓN

La Universidad de La Salle, el 18 de abril de 2008, adoptó el “PEUL – Proyecto Educativo Lasallista”. Dentro de éste programa se acogió la política de investigación y cambió el esquema de la misma para ser una universidad que aprende por que investiga y centró la investigación en los cuatro campos descritos como: educación, sociedad y cultura; desarrollo alimentario y agropecuario; ambiente, tecnología y salud; y crecimiento, desarrollo y equidad; todo ajustado al desarrollo humano sustentable. El presente proyecto nace como una respuesta a las metas planteadas en el SIUL, donde se privilegia la investigación, buscando mitigar, por medio del sondeo, fenómenos que afectan a las comunidades.

Para dar inicio a una investigación que permita conocer la estructura de mitigación más adecuada se requiere definir el escenario de arranque, es decir, se requiere un proceso de caracterización de condiciones actuales para plantear las posibilidades de mejora de dichas estructuras. Es por esto que se formuló este

trabajo de grado, el cual se vincula a los proyectos del Centro de Investigación de Riesgos de Obras Civiles, CIROC, en la línea de eventos naturales y materiales de obras civiles y que a su vez permitirá ahondar en el conocimiento actual del fenómeno de movimiento de bloques en el río, que afectan la vía que necesita una intervención definitiva para mejorar la calidad de vida de la comunidad y reducir el riesgo de colapso y afectación de las obras circundantes.

3.4. OBJETIVOS

3.4.1. Objetivo general

Determinar cuál es la estructura de disipación de energía y control de movimiento de bloques más adecuada en el sector de Paraíso, ubicado en el Km 5+000 de la vía Pacho – La Palma, por medio de un modelo hidráulico físico.

3.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el movimiento de bloques del Río Negro, en el sector de Paraíso, zona rural del municipio de Pacho, departamento de Cundinamarca, en épocas de crecientes.

- Identificar las estructuras de contención actuales en el Río Negro, en el sector de Paraíso, zona rural del municipio de Pacho, departamento de Cundinamarca, y los efectos de los bloques sobre las mismas.
- Realizar un modelo físico a escala reducida que permita establecer la acción de los bloques en el río y su impacto sobre las estructuras.
- Establecer la estructura óptima con base en los resultados del estudio, analizando las siguientes variables: caudal, empuje, granulometría.
- Establecer las conclusiones del uso de la estructura adoptada como la más adecuada.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

Un río es una corriente natural de agua que fluye con continuidad. Posee un caudal determinado, rara vez constante a lo largo del año. Son sistemas dinámicos y están en constante cambio debido a que sus contornos no se mantienen fijos por el flujo en sí y a acciones externas como la precipitación que es cualquier forma de hidrometeoro que cae a la corteza terrestre. Este incluye la lluvia, nieve, aguanieve, granizo, pero no la bruma ni el sereno que son formas de condensación. La precipitación que cae sobre un punto de una zona geográfica es llamada pluviosidad; con la geomorfología de un sector podemos determinar las características de su forma superficial y orígenes de este, de acuerdo a lo anterior podemos tener una idea de cómo será el comportamiento más probable en los fenómenos de erosión y movimiento de bloques, y de esa manera, saber hasta dónde llegan sus orillas y la extensión de su llanura aluvial.

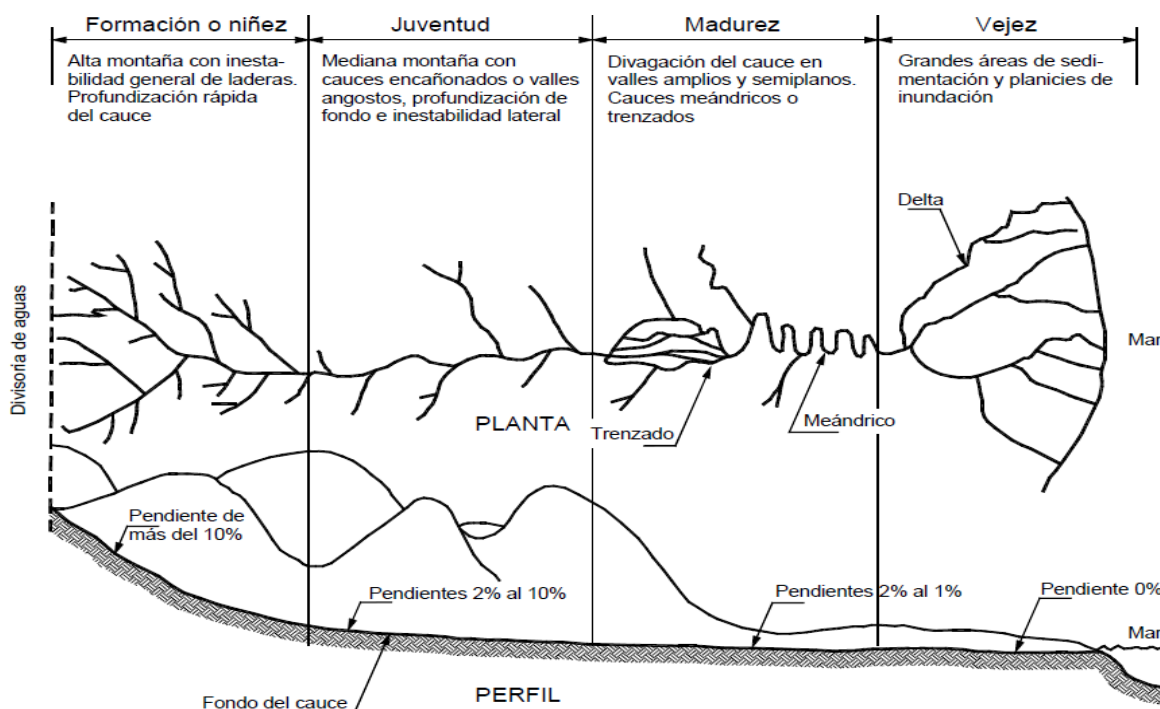
Existen otras variables que se deben examinar como la esorrentía la cantidad de agua que transita en la cuenca de drenaje, que es la altura de agua en milímetros escurrida dependiendo de la pendiente del área, normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del terreno-cap

vegetal.

Según la teoría de Horton la esorrentía se forma cuando la precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo, y es la principal causa de erosión a nivel mundial, ocasionando problemas en suelos arcillosos o suelos con poca cubierta vegetal. La evapotranspiración hace parte del ciclo hidrológico y es la pérdida de humedad por evaporación o transpiración de los vegetales y se mide en milímetros por una unidad de tiempo, cuando el agua alcanza la zonas subterráneas recarga los acuíferos o se consigue una descarga en el caudal de los ríos.

En las corrientes de agua se presentan etapas que deben ser identificadas y evaluadas para determinar su conducta erosiva. Por medio de la curva hipsométrica (ver Anexo 1), que es la más apropiada para determinar el tipo de lecho. Se tienen en cuenta las siguientes etapas: niñez, juventud, madurez y vejez de una cuenca. Un río entra en la etapa de la vejez cuando muestra un gradiente muy pequeño, y lleva excesiva cantidad de sedimentos, se moviliza muy lentamente por la llanura aluvial, formando, mediante curvas en forma de S sus orillas aledañas por la acción erosiva de la corriente. Se debe tener especial cuidado en la etapa de formación o niñez porque es básica en el proceso erosivo siendo este laminar, en surcos y cárcavas y el que aporta más sedimentos en su formación. En la Imagen 1 se muestra un esquema en donde se pueden distinguir las diferentes edades y sus causas más comunes para un río.

Imagen 1. Representación esquemática de las etapas de un río en áreas de montaña tropical.

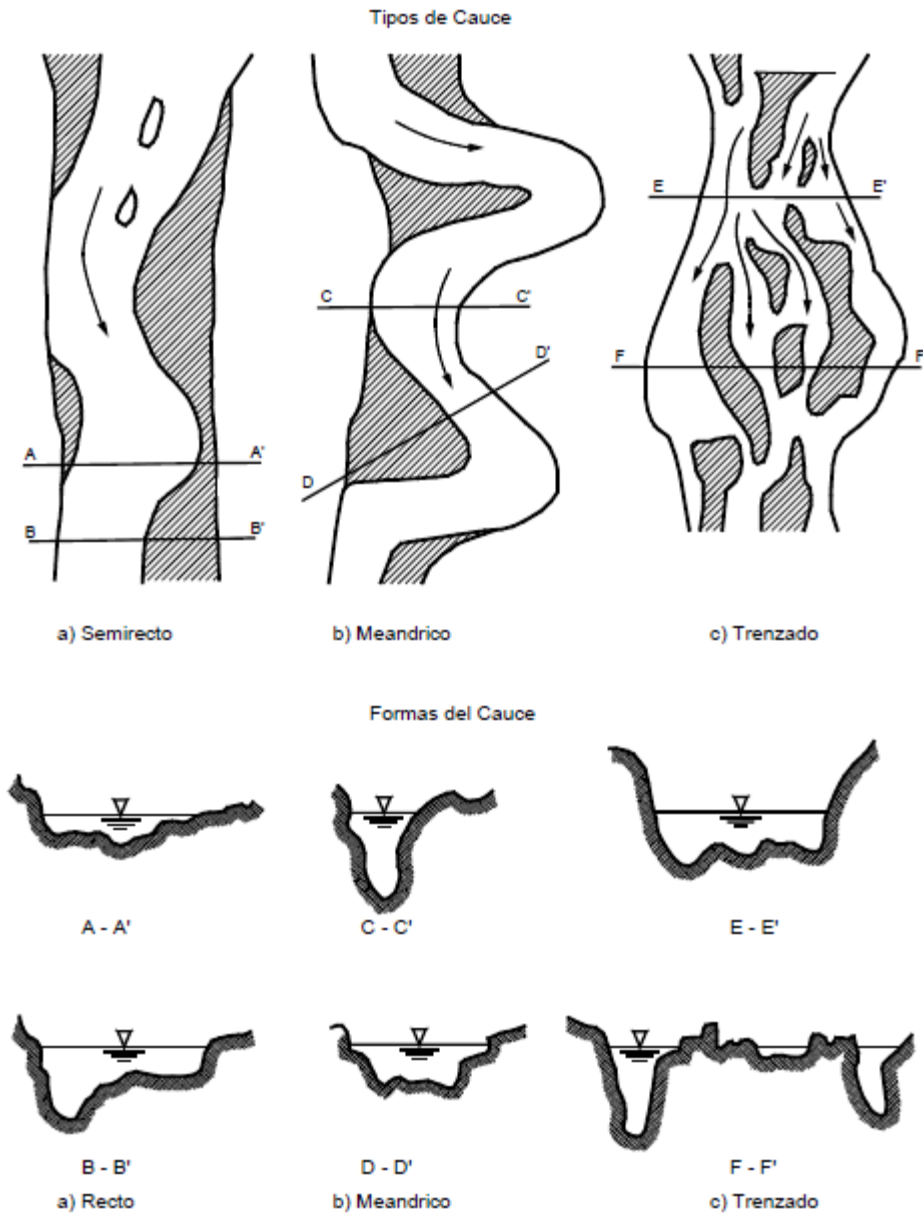


Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.¹

La morfología de un río es producto de la erosión, sedimentación y transporte de partículas del suelo del cauce. Usualmente se pueden identificar tres tipos de trazados como resultado de un equilibrio de fuerzas. En planta, estas formas se denominan sinuosas, trenzadas y meándricas (ver Imagen 2), y estas se pueden presentar en una misma corriente pero en diferentes sectores, determinados mayormente por un cambio en el caudal.

¹ SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. Librería UIS 2001. p. 87.

Imagen 2. Tipos principales de cauces viejos.



Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.²

El *thalweg* se define como la línea que marca la parte más honda de un valle, y es el camino por donde van las aguas de las corrientes naturales. Debido a la

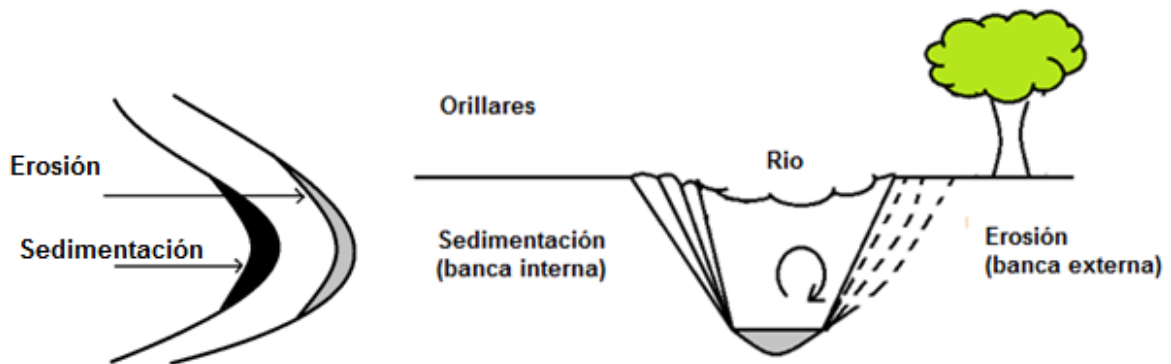
² Ibíd., p. 101

variabilidad de posición de los cauces trenzados, es difícil establecer un *thalweg* en ellos, sin embargo, todas las corrientes naturales poseen un *thalweg*.

- La forma sinuosa o semirrecta tiende a ser estable y se desarrolla en un único canal, usualmente es de ancho regular y con un movimiento que hace más predecible su comportamiento con coeficientes de sinuosidad por debajo de 1.5 en donde no se aprecian curvas en su cauce, por lo general a ambos lados de la corriente la sedimentación forma playones y barras.
- La morfología trenzada genera islas, son de gran anchura sus cauces y altamente inestables, estos tienen la característica de transportar grandes cantidades de sólidos y básicamente se encuentran en zonas planas. Estos patrones de canales dan origen a la geoforma aluvial conocida como llanura aluvial de río trenzado que Villota define como aquel cuyo lecho mayor se divide en varios canales menores que sucesivamente se bifurcan y reúnen aguas abajo, separados por islotes y playones llamados en conjunto barras de cauce.
- Finalmente se pueden encontrar los canales o cauces meándricos que se caracterizan por una pendiente suave, con transporte de sedimentos y partículas finas; el tamaño de los meandros es directamente proporcional al tamaño de sus corrientes y la amplitud o el ancho de estos meandros es en 15 a 20 veces el ancho promedio de la corriente que los origina. En estos ríos

meándricos se desarrolla un proceso de erosión y sedimentación de manera simultánea en sus orillas, lo cual da pie a fenómenos de erosión en su parte externa y sedimentación en la interna, como se muestra en la Imagen 3.

Imagen 3. Procesos de erosión y sedimentación en ríos meándricos.



Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.³

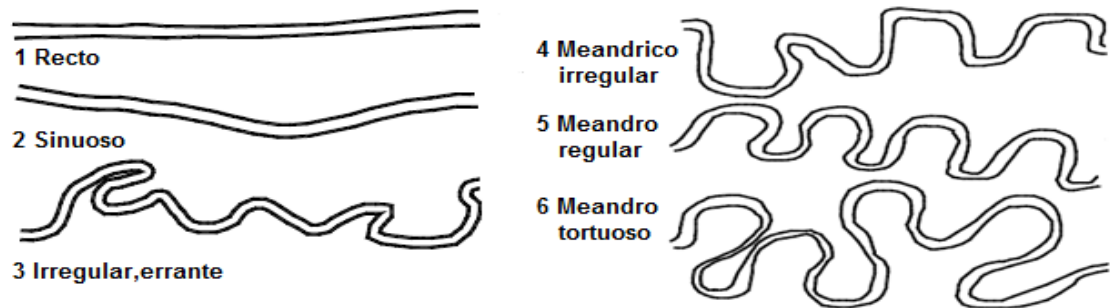
Una corriente se puede representar en un meandro con un patrón de flujo helicoidal con una considerable elevación de la superficie del agua contra la orilla externa, o conocida también como cóncava, determinada por la fuerza centrífuga; por lo tanto, en cada una de las curvas se generan dos componentes de la corriente, uno representado en la velocidad aguas abajo que golpea con fuerza la orilla externa y un segundo, más débil, que se dirige hacia la cara interna de la curva. El movimiento anteriormente descrito, es el que “genera la socavación, erosión y posterior desplome en la parte externa del meandro y la deposición en la parte interior del mismo, deposición que tendrá lugar en la orilla interna del

³ Ibíd., p.28.

siguiente meandro”⁴.

El tipo de curvas de los meandros pueden variar significativamente y en diferentes formas, con mucha diferencia de unos ríos a otros, en la Imagen 4 se representan los subtipos más relevantes a tener en cuenta.

Imagen 4. Clasificación de los meandros.



Fuente: MARTÍN VIDE, Juan Pedro. Ingeniería de ríos.⁵

Una variable fundamental en los procesos fluviales es la velocidad con la que el agua es transportada y esto implica un análisis de las distribuciones de tensión de arrastre, asociadas a las distribuciones de velocidad dentro del cauce o canal, de tal modo que la velocidad del agua es variable en cada punto de la columna de agua, siendo esta velocidad muy baja cerca a la parte externa del cauce y muy alta hacia el centro de la sección.

La presencia de trayectorias o flujos helicoidales está asociada directamente a la

4 Ibíd., p. 29.

5 Ibíd., p. 29.

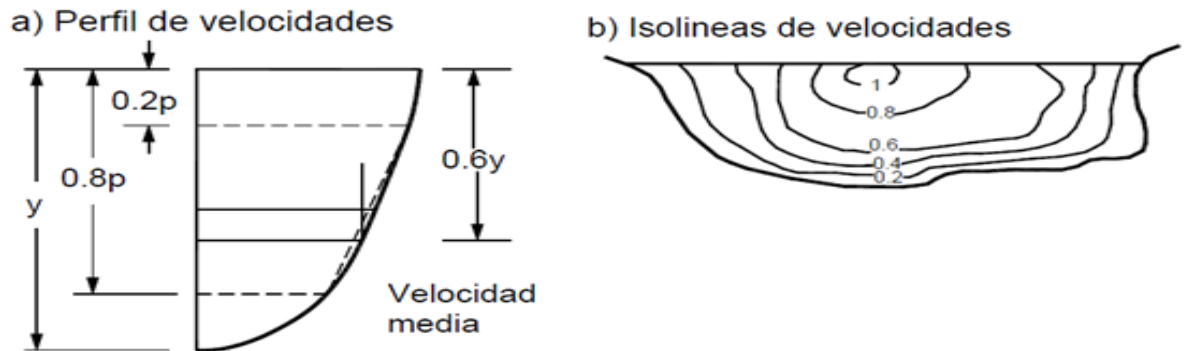
variación de la velocidad aguas abajo, presentando líneas de corriente que tiene un significado especial en el desarrollo de meandros y en la formación de rápidos y remansos de los tramos rectos. Según Suarez Díaz: “La velocidad promedio generalmente ocurre a un 60% del total de la profundidad del río, medido desde la superficie. La velocidad en sentido lateral es de aproximadamente diez a veinte por ciento de la velocidad en la dirección de la corriente en meandros de ríos maduros y de treinta a cincuenta por ciento en curvas de ríos de montaña. Este movimiento arrastra el suelo erosionado, el cual se deposita más adelante en las riberas interiores del cauce. En este proceso se produce un avance del río lateralmente y hacia delante de la curva”.⁶

Hay dos fuerzas principales que intervienen en el movimiento del agua: la gravedad que actúa en la dirección de aguas abajo y la fricción que se opone a este movimiento. La resultante de la interacción de ambas fuerzas determina la capacidad de la corriente para erosionar y transportar sedimentos. A su vez, la fuerza de fricción, que determina la resistencia que opone el contorno, puede expresarse por unidad de superficie como tensión de arrastre “*shear stress*”, por lo tanto, el gradiente de velocidad es proporcional y equivalente a la componente del peso del agua paralela a la superficie de deslizamiento. De manera experimental se ha podido determinar que la energía hidráulica de una corriente está en función de la magnitud del caudal de dicha corriente y de la superficie del cauce y que de

6 SUAREZ DIAZ, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. Librería UIS. 2001. p. 92.

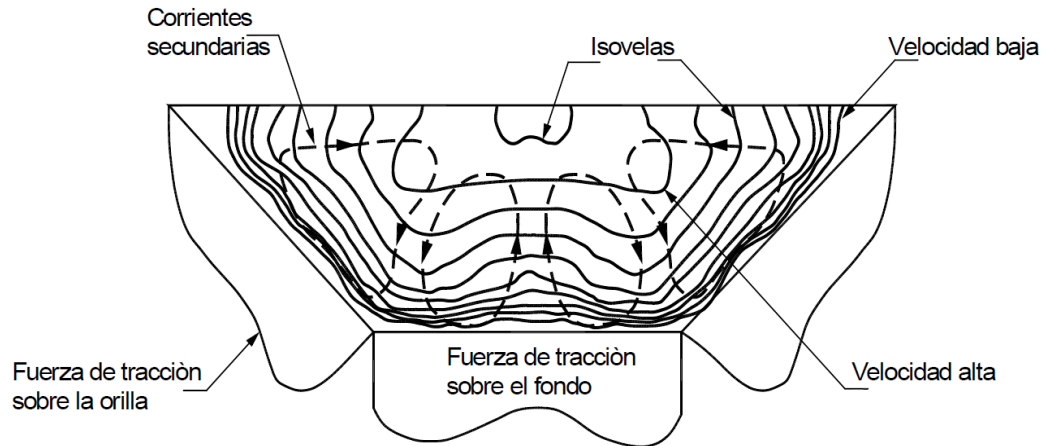
igual manera, afecta mucho la rectificación de trazados cuando estos son alterados por la mano de hombre (ver Imágenes 5 y 6).

Imagen 5. Distribución de velocidades en la sección del cauce de un río



Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.⁷

Imagen 6. Velocidades, corrientes secundarias y fuerzas de tracción sobre el cauce



Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.⁸

⁷ Ibíd., p. 92.

⁸ Ibíd., p. 93.

4.2. MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL

La mejor manera de comprender los temas tratados en esta investigación es hacer una referencia directa de los contenidos y términos a tratar, aquellos que van a ser una constante de ahora en adelante y que deben tener claridad como conceptos básicos. Estos están relacionados con los términos más usuales en hidráulica y sobre todo en hidráulica fluvial, así como el comportamiento de los mismos y su conformación geométrica. La mayoría de los cursos naturales tienen secciones transversales similares a parábolas o trapecios, en los cuales es posible definir los siguientes parámetros en trazados más o menos rectos geométricos:

4.2.1. Parámetros físicos de la sección transversal

- **Profundidad del flujo (y):** Es la distancia entre el punto más bajo de la sección del canal y la superficie libre.
- **Área mojada (A):** Es el área contenida entre el perímetro mojado y el ancho superficial.
- **Perímetro mojado (P):** Es la longitud de la línea de intersección de la superficie del canal mojado y el plano de la sección transversal.

- **Ancho superficial (T):** Es el ancho de la sección transversal en la superficie libre.
- **Radio hidráulico (R):** Es la relación entre el área mojada y el perímetro mojado:

$$R = A / P \quad (1)$$

- **Profundidad hidráulica (D):** Es la relación entre el área mojada y el ancho superficial:

$$D = A / T \quad (2)$$

4.2.2. Parámetros adimensionales

Los parámetros adimensionales son cocientes y productos de cantidades con unidades que se cancelan entre sí. Los parámetros adimensionales se utilizan para determinar las características de ciertos sistemas de la naturaleza. Cuando se estudian los fluidos es particularmente importante conocer los siguientes parámetros adimensionales:

- **Número de Froude (F):** El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por una relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas de gravedad.

Esta relación se da por el número de Froude, definido así:

$$F = v / (g * L)^{1/2} \quad (3)$$

Donde “v” es la velocidad media del flujo, “g” es la aceleración de la gravedad y “L” es una longitud característica. En flujos en canal abierto, la longitud característica se hace igual a la profundidad hidráulica⁹.

Este parámetro determina tres estados de flujo: Subcrítico, crítico y supercrítico.

❖ **Flujo subcrítico:** “El papel jugado por las fuerzas gravitacionales es más pronunciado; por lo tanto, el flujo tiene una velocidad baja y a menudo se describe como tranquilo y de corriente lenta”¹⁰. En este caso el número de Froude es menor que la unidad.

❖ **Flujo crítico:** El flujo no se ve dominado en mayor o menor medida por fuerzas inerciales o gravitacionales. En este caso el número de Froude es igual a la unidad.

⁹ CHOW, Ven Te. Hidráulica de los canales abiertos. México: Editorial Diana, 1982. p. 13.

¹⁰ CHOW, Ven Te, Op. cit., p. 13.

❖ **Flujo supercrítico:** “Las fuerzas inerciales se vuelven dominantes; el flujo tiene una alta velocidad y se describe usualmente como rápido, ultrarrápido y torrencial”¹¹ este caso el número de Froude es mayor que la unidad.

- **Número de Reynolds:** El efecto de la viscosidad sobre el estado de flujo se representa por una relación de las fuerzas de inercia a las fuerzas viscosas y determina tres estados de flujo:

❖ **Flujo laminar:** Se manifiesta cuando “las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las fuerzas inerciales”¹². En este caso las líneas de corriente pueden determinarse fácilmente, En este caso el Número de Reynolds $Re \leq 2000$.

❖ **Flujo turbulento:** Se manifiesta cuando “las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales”¹³. En este caso las líneas de corriente no se pueden determinar fácilmente, pero en conjunto el flujo sigue una sola trayectoria, En este caso el Número de Reynolds $Re \geq 4000$.

❖ **Flujo de transición:** Es un estado de flujo que no es ni laminar ni turbulento, sino que se encuentra entre los dos, como su nombre lo indica, En este caso el Número de Reynolds $Re \geq 2000$ y ≤ 4000 .

¹¹ *Ibíd.*, p. 13

¹² *Ibíd.*, p. 7.

¹³ *Ibíd.*, p. 8.

En el flujo en canales abiertos, experimentalmente se ha determinado que el flujo laminar comprende valores de \hat{R} menores que 500 y el flujo turbulento comprende valores de \hat{R} mayores que 2000 normalmente. Valores intermedios indican que el flujo es de transición.

El efecto de la viscosidad en relación con la inercia puede representarse a través del número de Reynolds (\hat{R}), definido por:

$$\hat{R} = v * L / \nu \quad (4)$$

Donde “v” es la velocidad del flujo, “L” es una longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido, igual a la viscosidad dinámica dividida por la densidad¹⁴.

4.2.3. Erosión

La erosión comprende el desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por la acción de la fuerza de un fluido en movimiento. La erosión puede ser generada tanto por el agua como por el viento. Las actividades humanas frecuentemente intensifican o aceleran la erosión,

¹⁴ Ibid., p. 8.

especialmente por la deforestación o la remoción de la capa vegetal¹⁵.

La erosión se puede clasificar como erosión fluvial, marina, glacial, eólica, kárstica y biótica. La erosión objeto en este trabajo de grado es la erosión fluvial.

- **Erosión biótica:** se produce por la acción del hombre y de los animales, los animales por el sobrepastoreo y al arrancar el pasto de raíz, el hombre es el principal modificador de la corteza terrestre con la agricultura, contaminación, deforestación y explotación de recursos minerales.
- **Erosión kárstica:** es causada por la infiltración de aguas superficiales formando grutas, se da por la disolución de carbonato cálcico.
- **Erosión eólica:** es el movimiento del viento que ejerce fuerzas de fricción y levanta las partículas de suelo, despegándolas transportándolas y depositándolas en otro lugar.
- **Erosión glacial:** es la erosión causada por el movimiento de hielo al momento de desprenderse por efecto de la gravedad que la atrae hacia un valle.
- **Erosión marina:** es la fuerza de las olas al ascender y descender por una

15 SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. Bucaramanga: Instituto de investigaciones sobre erosión y deslizamientos, 2001. p. 15.

superficie produciendo el desprendimiento y transporte de partículas.

- **Erosión fluvial:** Es el desplazamiento ocasionado por el agua que provoca el humedecimiento del terreno y posterior derrumbamiento por pendientes grandes o pequeñas. Pueden presentarse dos tipos de erosión fluvial que afecten el cauce:

- ❖ Erosión lateral que amplía su ancho, aumentando la altura de los taludes.

- ❖ Profundización del cauce.

La erosión, en ambos casos, está en manos de las condiciones geotécnicas de los materiales de la base y los taludes, su geometría, pendiente y particularidades de flujo del agua. La estabilidad del talud depende de los parámetros de resistencia (cohesión aparente c' , ángulo de fricción interna ϕ'), el peso unitario, la altura, la pendiente y las características geológicas. Así mismo se debe tener en cuenta que para cada tipo de suelo y agua existe una velocidad específica de arrastre (ver Tabla 1).

Tabla 1. Velocidad de arrastre para distintas condiciones del agua (m/s)

MATERIALES	AGUAS LIMPIAS	AGUAS CON LIMOS FINOS	AGUAS CON ARENAS Y GRAVAS
Arena fina	0,45	0,76	0,45
Arena limosa	0,53	0,76	0,61
Limos arenosos	0,61	0,91	0,61
Limos no coloidales	0,61	1,06	0,61
Ceniza volcánica	0,75	0,9	0,6
Grava finas	0,76	1,52	1,14
Arcillas compactas	1,14	1,51	0,91
Arena grava limosa	1,14	1,52	0,9
Limos colídales	1,15	1,52	1,52
Gravas gruesas	1,2	1,5	0,9
Limos colídales y guijarros	1,22	1,68	1,52
Guijarros	1,22	1,82	1,98
Cantos aluviales	1,5	1,65	1,95
Lotitas fracturadas	1,8	1,8	1,5
Esquistos y bloques de roca	1,82	1,82	1,42

Fuente: Suarez Díaz, control de erosión en zonas tropicales.¹⁶

4.2.4. Erosionabilidad

“Es la susceptibilidad o facilidad con que un suelo es desprendido y transportado por los fenómenos erosivos”¹⁷. Dentro de los factores que más influyen están:

- Tamaño y distribución de las partículas.
- Tipo y características del suelo.

¹⁶ SUÁREZ DÍAZ, Jaime, Óp. cit., p. 49.

¹⁷ Ibíd., p. 49

- Temperatura.
- Factores geométricos (estado de esfuerzos).
- Área de la cuenca.
- Intensidad de la lluvia.
- Pendiente del terreno.
- Características de la esorrentía.
- Características de la cobertura vegetal.¹⁸

Los métodos utilizados para reducir la erosión y disipar la energía de las crecientes incluyen soluciones de “alta” ingeniería que son elementos permanentes diseñados para disipar o reflejar los caudales máximos, y soluciones de “baja” ingeniería que no involucran estructuras persistentes. Ejemplos de alta ingeniería son las barreras rompeolas, escolleras, espigones. Las soluciones de baja ingeniería generalmente involucran buena planeación y prevención, y en ocasiones remoción de estructuras para permitir el flujo natural de las aguas y el

¹⁸ *Ibíd.*, p. 48

transporte normal de arenas y bloques. Estas soluciones también incluyen “líneas de costa vivientes” que involucran plantar praderas submarinas y otras plantas de humedal nativas, que protegen naturalmente las orillas del río.

Las soluciones de baja ingeniería son preferibles porque retienen la forma natural de los bordes del río y la playa y porque las estructuras permanentes, paradójicamente, generalmente aceleran las pérdidas de arena, especialmente corriente abajo. Estas estructuras también tienden a causar olas que eventualmente destruyen las estructuras. Así, una vez las estructuras permanentes están puestas, son costosas de mantener y difíciles de remover para corregir un error o para adaptarse a nuevos cambios.

Las mejores soluciones serán aquellas basadas en un entendimiento meticuloso de la acción de las olas local y el flujo del agua. Así, es importante trabajar con expertos en construcción de obras hidráulicas para determinar los mejores métodos de estabilización de las márgenes con base en la energía de las crecientes y el transporte de bloques que ocurre en ese sitio particular

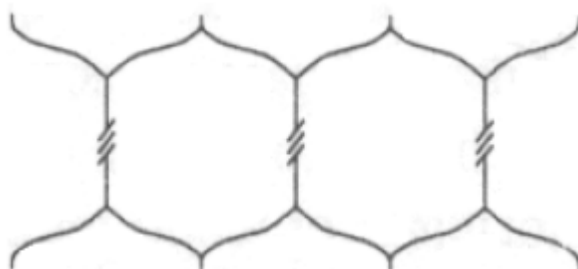
4.2.5. Obras hidráulicas o infraestructuras hidráulicas

“Se entiende por obra hidráulica o infraestructura hidráulica a una construcción, en el campo de la ingeniería civil, donde el elemento dominante tiene que ver con el

agua”¹⁹. Las obras hidráulicas pueden fragmentarse en distintos conjuntos, por ejemplo represas, canales, esclusas, estaciones de bombeo, sistemas de almacenamiento de agua potable, sistemas de riego, sistemas de recogida de aguas residuales, sistemas de drenaje, sistemas de recarga de acuíferos y sistemas de defensa ribereña, entre otros.

En ingeniería, los gaviones son contenedores de piedras retenidas con malla de alambre (ver Imagen 7). Se colocan al pie de la obra desarmados y, una vez en su sitio, se rellenan con piedras del lugar. Trabajan como estructuras de gravedad, son elementos permeables, que generalmente requieren la construcción de un filtro. Puede adaptarse a pequeñas erosiones o asentos del substrato. Se dividen en gaviones de cuerpo, de base y de revestimiento (ver imagen 8).²⁰

Imagen 7. Malla de un gavión



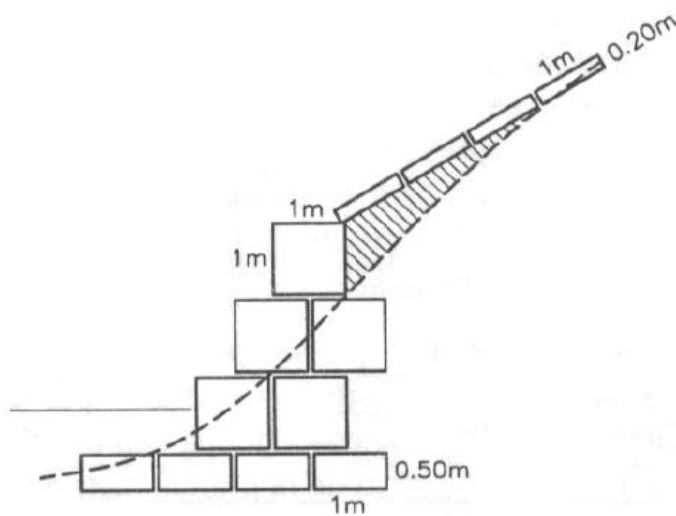
Fuente: MARTÍN VIDE, Juan Pedro. Ingeniería de ríos.²¹

19 BOTIA, Luis., JAIMES, John., RONCANCIO, Wilmar. Análisis de alternativas en un modelo hidráulico reducido para mitigar la socavación producida por el río chocho en el club el bosque Bogotá, 2008, 90p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de La Salle. Programa de Ingeniería Civil.

20 Ibíd., p. 35

21 Ibíd., p. 220

Imagen 8. Características de una protección con gaviones, combinando sus tres modalidades.



Fuente: MARTÍN VIDE, Juan Pedro. Ingeniería de ríos.²²

- **La escollera (o enrocado):** Es el módulo formado por agrupación de elementos pétreos naturales, habitualmente procedentes de cantera, los elementos o escollos se ubican sin aglomerante de manera que el bloque no es monolítico. Su firmeza se debe al peso propio de los escollos y a su superposición. Se pueden formar estructuras independientes cuyo funcionamiento es por gravedad, son estructuras permeables y de poca resistencia, por esta razón no suele utilizarse como una estructura independiente, en la mayoría de los casos se utiliza como caparazón, protección o defensa de otra estructura. La protección de escollera o rip rap ha sido y continúa siendo hoy día uno de los métodos más utilizados en todo el mundo debido principalmente a sus características de flexibilidad, larga duración, facilidad de puesta en obra y reparación, Además de su apariencia

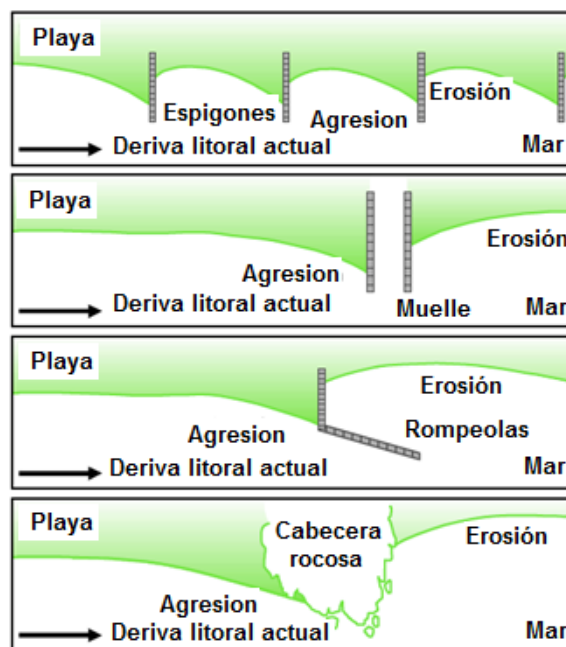
²² MARTÍN VIDE, Juan Pedro. Ingeniería de ríos. México, D.F.: Editorial Alfa omega, 2003. p. 219.

natural.

- **Espolones:** Espolones, rompeolas y espigones de protección de un canal son estructuras predominantemente construidas de rocas o concreto. Los espolones o sus variaciones son colocadas perpendicularmente a la orilla para atrapar arena corriente arriba, al extenderse dentro del agua e interrumpir la deriva litoral, causando deposición de arena. Sin embargo, después de que la columna de agua pierde su contenido de arena, su velocidad aumenta alrededor del espolón y saca arena del lado corriente abajo, resultando en erosión y pérdida de playa (estos procesos ocurren naturalmente alrededor de puntas rocosas). Estas estructuras tienden a causar más problemas que los que resuelven, a menos de que estén cuidadosamente diseñados y puestos en los lugares apropiados, en relación a características de la costa, y patrones de las olas y la deriva (Ver Imagen 9).²³

23 Drumm, Andy, Alan Moore, Andrew Sales, Carol Patterson, and John E. Terborgh. 2004. Ecotourism Development: A Manual for Conservation Planners and Managers. Volume II. The Business of Ecotourism Development and Management. The Nature Conservancy, Arlington, Virginia, USA.

Imagen 9. Esquema de la erosión generada por el flujo en los espigones.



Fuente: Ecotourism Development: A Manual for Conservation Planners and Managers.

- **Muros de contención:** Los muros de contención deben ser diseñados de tal forma que resistan la presión lateral de la tierra, las presiones de poros, el peso propio de la estructura e incluso las cargas sísmicas a las cuales pueden estar sometidos, de manera similar, se tiene en cuenta la vida útil y servicio, se considera en los análisis factores como los efectos ocasionados a largo plazo, del deterioro de materiales que componen la estructura de disipación de energía.

Un muro de contención se diseña como mínimo para una vida útil de 50 años, de acuerdo con la AASHTO, cuando este es temporal la vida útil debe ser superior a 5 años.

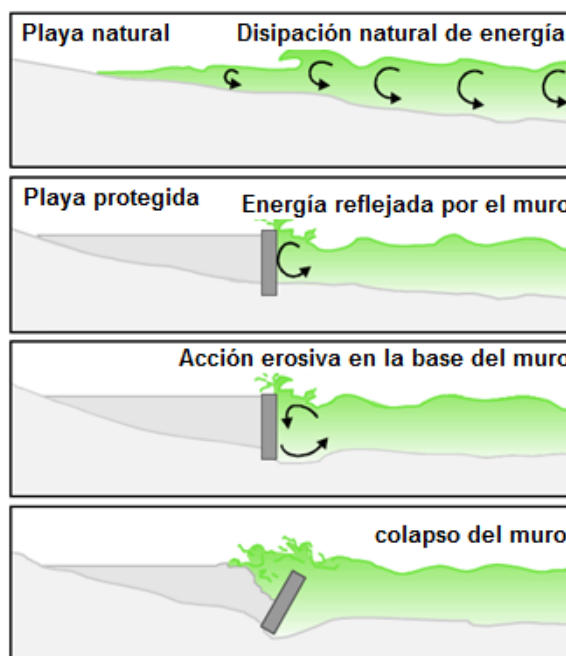
Los muros de contención se clasifican en:

- ❖ Muros de gravedad: su estabilidad depende de su peso, son construidos de tal manera que su este contrarreste el empuje del terreno, por sus grandes dimensiones no sufren esfuerzos flectores.
- ❖ Muros de semi-gravedad: son más esbeltos que los anteriores, necesitan una armadura en el tablero prolongada hasta la zapata (armadura principal de la estructura).
- ❖ Muros en voladizo: su tablero y base son de hormigón armado, deben resistir esfuerzos cortantes, se utiliza arena limpia y grava como material de relleno, en suelos muy permeables se recomienda hacer drenajes.
- ❖ Muros anclados: se utilizan principalmente en trabajos de estabilización de obras civiles, para transmitir al terreno cargas de una estructura tanto a tensión como a compresión el cual se desea mejorar su capacidad de carga.

La escogencia del tipo de muro a usar depende de varios criterios, tales como cargas de diseño, profundidad del suelo, presencia de factores ambientales que produzcan deterioro, geometría del zona, asentamiento, facilidad de la construcción, mantenimiento y costos de la obra entre otros.

Los muros de contención actúan como paredes verticales sólidas de concreto o metal que tienen todas el mismo propósito. Estos métodos se utilizan para combatir la erosión y disipar la energía porque requieren menos material y espacio. Sin embargo, gracias a su naturaleza vertical, la energía de reflexión se maximiza, creando el potencial de destruir las orillas u otras formas que se buscan proteger, como se muestra en la Imagen 10.²⁴

Imagen 10. Esquema del colapso de estructuras por socavación.



Fuente: Tourism and Biodiversity, Mapping Tourism's Global Footprint.

²⁴ Christ, Costas, Oliver Hillel, Seleni Matus, and Jamie Sweeting. 2003. Tourism and Biodiversity, Mapping Tourism's Global Footprint. Conservation International and UNEP, Washington, DC, USA

4.2.6. Modelo físico reducido

En ingeniería, se llama modelo físico reducido a las construcciones a escala fabricadas con el fin de simular un comportamiento real y así diseñar estructuras con mayor eficiencia, antes de realizar la obra. A partir de esta condición, se puede precisar el modelo hidráulico reducido como una construcción a escala reducida de un cuerpo de agua (generalmente un río), para experimentar el comportamiento de obras hidráulicas dentro de dicho modelo, puesto que las condiciones de similitud son el requerimiento necesario que permite la extrapolación de los resultados leídos en el modelo hacia el prototipo. Estas condiciones se conocen como criterios de semejanza y son los siguientes:

- **Semejanza geométrica:** se extiende la rigurosidad superficial del comportamiento real al modelo a escala reducida, si el modelo tiene un décimo del tamaño del comportamiento real en cualquier dimensión lineal, la altura de las proyecciones de la rugosidad deben tener la misma relación, las relaciones de los diferentes tipos de fuerza deben ser las mismas en puntos correspondientes.
- **Semejanza cinemática:** dos sistemas de flujo se dice que son cinematicamente semejante cuando el comportamiento real y el modelo a escala reducida describen en intervalos de tiempo correspondientes trayectorias

geométricamente semejantes.

- **Semejanza dinámica:** para una similitud dinámica estricta, los números de Reynolds y froude deben ser los mismos tanto en el comportamiento real como en el modelo a escala reducida.

4.2.7. Fuerzas de arrastre o de la resistencia universal

Considerando el paso y el régimen de continuidad de un fluido isotérmico a lo largo de la superficie de un cuerpo sólido, la situación puede ser la de cualquier sistema en el cual las superficies límites del sólido estén bien definidas, así como la cantidad de un fluido en movimiento relativo con respecto a dichas superficies, por ejemplo, una cantidad infinita de aire pasando por una esfera, o una corriente de agua fluyendo por un tubo.

Si se considera que las superficies limítrofes del sólido están en movimiento, y el fluido situado ante el sólido se halla en reposo, el problema que suele presentarse es el de la determinación de la fuerza necesaria para mantener el sólido en movimiento a velocidad constante a través del fluido. El efecto contrario del sólido sobre el fluido será el de acelerarlo o producir un impulso o cantidad de movimiento en el mismo. Con arreglo a la ley de Newton, esta fuerza es igual a la variación del impulso con el tiempo, y aplicándola al fluido resulta:

$$F = d (m * U) / dt = m * (dU / dt) + U * (dm / dt) \quad (5)$$

Donde:

F = Fuerza que actúa sobre el fluido.

m = Masa del fluido

U = Velocidad máxima a la cual el fluido es impulsado por el sólido en movimiento.

Si el sólido esta en movimiento a velocidad constante, se deduce que la velocidad del fluido, debida a la acción del sólido, es una constante independiente del tiempo, y la ecuación (5) se reduce a:

$$F = U * (dm / dt) \quad (6)$$

No obstante **dm / dt** es la masa de fluido sobre la que el sólido actúa en la unidad de tiempo, valor que es proporcional al área representativa de la superficie A del sólido y a la distancia que este recorre en la unidad de tiempo, es decir, a la velocidad del sólido. Por esto y siendo ρ la densidad del fluido:

$$F = \rho * A * v * U \quad (7)$$

La velocidad máxima **U**, a la cual el fluido resulta acelerado, están relacionadas por un factor que solo depende de la distribución del flujo para los sistemas geoméricamente semejantes esto conduce a la ecuación:

$$F = f'' * \rho * A * v^2 \quad (8)$$

Donde f'' es solamente una función de número de Reynolds para todos los sistemas geoméricamente semejantes, la ecuación (8) resulta general para todos los sistemas fluidos-sólidos, en movimiento permanente (suponiendo continuidad de propiedades y efectos de gravitación y elásticos despreciables).

La ecuación de resistencia de arrastres (como se denomina con frecuencia) suele expresarse, en general, del modo siguiente:

$$F = 0,5 * \rho * A * v^2 \quad (9)$$

Por lo tanto la Fuerza de arrastre será:

$$F = (\rho * Q^2) / (2 * A) \quad (10)$$

4.3. MARCO NORMATIVO

Tabla 2. Normatividad

NORMA	TÍTULO	DESCRIPCIÓN
I.N.V E-122	Humedad natural	Determinación de la humedad natural de una muestra desuelo
I.N.V E-123	Granulometría	Análisis granulométrico de suelos por tamizado
I.N.V E-125	Límite líquido	Determinación del límite líquido de los suelos
I.N.V E-126	Limite plástico	Determinación del límite plástico e índice de plasticidad

4.4. MARCO CONTEXTUAL

El municipio de Pacho se encuentra al noroccidente del departamento de Cundinamarca en la Provincia del Río Negro del cual es cabecera y a al cual también pertenecen los municipios de La Palma, Yacopi, Caparrapí, El Peñón, Paime, Topaipi, Villagomez y San Cayetano.

Para un manejo más organizado y productivo, el municipio se ha dividido en 6 sectores denominados Unidades de Manejo de Subcuenca (U.M.S.C.), una de ellas la Subcuenca del Río Veraguas a la que pertenece la vereda de La Hoya, por donde pasa la vía que comunica al municipio de Pacho con el municipio de La Palma (vía intermunicipal de orden Nacional Pavimentada), sobre la cual, en el Km 5+000, se realizó el estudio.

La zona en estudio se encuentra ubicada geográficamente a 5° 22' 05" de latitud Norte y 74° 18' 74" de longitud Oeste, altitud media de 2.132 m.²⁵

En el Anexo 2 se presenta el mapa con la división política del departamento de Cundinamarca y la localización del área de estudio.

En cuanto a los aspectos socioeconómicos, en la zona predomina la actividad agropecuaria por la diversidad climatológica, permitiendo el desarrollo agrícola y pecuario de diferentes productos, la riqueza hídrica ha permitido últimamente desarrollar la actividad piscícola con tendencia al crecimiento. El 70% de las actividades agropecuarias son realizadas por pequeños productores minifundistas (Datos estadísticos de la UMATA)²⁶.

El municipio de Pacho presenta grandes oportunidades de desarrollo económico y social, por su posición geográfica privilegiada cercana al Magdalena Medio, a manera de paso o como salida alterna a esta importante zona del país y dadas las posibilidades de desarrollo turístico de Puerto Salgar, el mejoramiento de la Vía Pacho- La Palma en proceso de rehabilitación y la cercanía al mercado más grande del país como la ciudad de Bogotá.

Pero estas oportunidades se ven amenazadas por varias circunstancias entre las

25 MUNICIPIO DE PACHO, Plan Básico de ordenamiento territorial. Agosto 21 de 2000. p.5.

26 MUNICIPIO DE PACHO, Óp. cit., p. 25.

que podemos destacar el deterioro de la infraestructura vial, la presencia de fallas geológicas que determinan áreas de amenazas y riesgos naturales y el mal manejo de los suelos.

Las principales características físicas de la zona en estudio se presentan a continuación según el plan básico de ordenamiento territorial (PBOT).

- **Geología:** Se presentan diferentes formaciones del terciario y del cretáceo, las principales formaciones que se presentan en la zona de estudio son: La formación La Cira, se caracteriza por presentar un conjunto laminar arcilloso y superior arenoso compacto con roca madura, este cubre un 26.10% del río Negro para un total de 1635.25 Ha del área de las subcuencas. La formación Villeta medio, se caracteriza por limonitas, lutitas y arcillositas grises claras a negras con secuencia calcárea, se encuentra especialmente en un 39.97% de la subcuenca del río negro. Formación Caqueza, se presentan areniscas consolidadas y arcillolitas corresponde a un total de 19.89% de la subcuenca del río Negro y por último la formación Villeta inferior que presenta lutitas y limolitas negras con pirita y sulfuros, corresponde un 10.67% del río Negro.²⁷
- **Precipitación:** El municipio se halla rodeado por formaciones montañosas, la distribución y combinación de elementos y factores contribuyen a determinar los tipos de vegetación, suelos, erosión y los regímenes hidrológicos. La

²⁷ Ibid., p. 18-25.

precipitación media anual es de 1670mm y la media mensual es de 116.9mm. Este régimen está influenciado por la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual sufre intensificaciones o atenuaciones en su efecto por el factor orográfico. La distribución temporal de la precipitación es de tipo bimodal con un ligero descenso en los meses de Febrero y Junio. La temporada lluviosa empieza en Abril y se prolonga hasta el mes de mayo con un segundo periodo que va de Septiembre a Noviembre. El periodo seco va de Diciembre a Marzo y de junio a Agosto.²⁸

- **Sistema Natural:** El municipio de pacho presenta grandes limitantes en sus características biofísicas, especialmente en lo relacionado con los suelos y la topografía. Algunas de las áreas de riesgos o amenazas naturales se encuentran ubicadas en inmediaciones del casco urbano de pacho. Otras áreas con alta susceptibilidad a los riesgos y amenazas es la subcuenca Q. Honda en la parte baja del municipio. Las altas pendientes se constituyen en otro factor determinante y limitante de las actividades antrópicas. La vegetación nativa ha sido destruida encontrándose solo relictos de bosque natural secundario, la fauna ha sido prácticamente destruida.

La dinámica fluvial del Río Negro, también representa riesgo y amenaza en especial por fenómenos de socavación y erosión lateral, específicamente sobre la infraestructura vial y algunos sectores poblados. El riesgo sísmico se

²⁸ Ibíd., p. 98.

encuentra en el rango medio de acuerdo al Mapa de Riesgo Sísmico para Colombia del INGEOMINAS. En el municipio se identifican varios ecosistemas estratégicos de importancia local y regional, estos son: Páramo de Guerrero, Cuchilla de Capira, Cuchilla de El Tablón y El Tablazo, Cauce del Río Negro.²⁹

²⁹ *Ibíd.*, p. 124

5. METODOLOGÍA

Se realizó un reconocimiento teórico del estado del arte de la investigación, resultados que se mostraron en el marco teórico de este informe. En una segunda etapa se visitó el área afectada con el fin de recopilar información fotográfica, topográfica y del estado actual de la zona (ver Fotografías 1, 2 y 3).

Fotografía 1. Estado actual de la estructura de contención en el tramo de estudio en el Rio Negro.



Fotografía 2. Margen derecha del rio en el tramo de estudio de Rio Negro.



Fotografía 3. Cauce del Rio Negro.



5.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La investigación realizada es de tipo experimental, de acuerdo a lo expresado por Mario Tamayo y Tamayo, la investigación es de este tipo “cuando a través de un experimento se pretende llegar a la causa de un fenómeno. Su esencia es la de someter al objeto de estudio a la influencia de ciertas variables independientes en condiciones controladas y conocidas por los investigadores”.³⁰

5.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Para la consecución del objetivo general, la investigación se dividió en cuatro fases:

5.2.1.Fase 1. Estudios previos - contextualización

- **Recopilación de los datos topográficos de la zona.** Se buscaron y analizaron los registros topográficos de la zona con el fin de conocer la ubicación geográfica del sector de la problemática.

30 TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. México, D.F.: Limusa, 1995. p.111.

- **Recopilación de la información climatológica del área de estudio.** Se visitó la estación meteorológica 2E+06 Tobia, del IDEAM, y se obtuvieron los datos históricos de lluvias que se han presentado en el sector, y los caudales mínimos, medios y máximos que transporta el Río Negro en el sector de análisis.
- **Descripción topográfica de la zona.** El área se caracteriza por tener una pendiente fuerte, su clasificación es de cauce aluvial, sus márgenes y su fondo están constituidos por material sedimentario transportado por el arrastre propio del cauce. Existe vegetación densa en el costado derecho en dirección aguas abajo del río, entre tanto, al lado contrario la vegetación es mínima, teniendo en cuenta que es por este costado que está construida la vía. El río no tiene llanura de inundación, y tampoco hay presencia de diques naturales, pero si meandros irregulares y mal formados.

5.2.2. Fase 2. Construcción del modelo hidráulico reducido

- **Primera salida de campo (Reconocimiento visual de la zona).** Se realizó una visita para conocer el sector paraíso Km 5+000 que está ubicado en la vía pacho la palma Cundinamarca a 80 Km de Bogotá D.C., se estimó el tiempo de recorrido desde Bogotá D.C., y se determinó un promedio de dos horas treinta

minutos hasta el sector de estudio, se identificaron fenómenos de erosión, socavación, por falta de vegetación a la margen derecha del río, en la otra margen si existen arboles de una altura de 10 metros promedio, la estructura existente presenta un deterioro considerable en su parte frontal posiblemente debido a los impactos de las rocas de gran tamaño.

- **Segunda salida de campo (Levantamiento topográfico).** Con el apoyo de un topógrafo y un ayudante se realizó una batimetría del área con el fin de conocer la profundidad real del río. La profundidad promedio encontrada en el sector de estudio, obtenida de la medida tomada en tres secciones transversales diferentes es 115 cm, y a partir de este resultado realizar el modelo a escala reducida con todas las curvas de nivel. El resultado de esta batimetría se presenta en el Anexo 6.
- **Tercera salida de campo (Toma de muestras del suelo).** Por razones de tiempo en las dos primeras salidas no se pudo realizar la recolección de las muestras del suelo, objetivo trazado para la tercera visita, encontrando las siguientes características, los tipos de suelos presentes fueron un conjunto lamiar arcilloso y con una capa superior arenosa, estas arcillas son de color grises, verdosas rocas de tamaños que se especifican en la Tabla 4, sección 6.6.

- **Diseño hidráulico del modelo.** Con la batimetría realizada y teniendo en cuenta las dimensiones de la estructura existente (largo 7,00 m, alto 3,00 m, ancho 0,50 m), se calcularon las escalas horizontal y vertical del modelo, adicionalmente, las escalas de caudal, diámetro de la partícula y masa, con todos estos datos se diseñó el modelo hidráulico.
- **Construcción del modelo hidráulico.** Por razones de costos y facilidad en la construcción, se eligió el poliestireno como material para la construcción de las capas de curvas de nivel del modelo. Se eligieron tres grupos de tamaño diferentes para las rocas que transporta el río, estas se pintaron de tres colores, amarillo las más grandes, que corresponde al tamiz pasa 2" y son las rocas que escalan las rocas de tamaño 56 cm x 31 cm, negro las de tamaño mediano, que corresponde al tamiz pasa 1.5" (tamaño real 32 cm X 28 cm), y las pequeñas de rojo, que corresponde al tamiz 1" (tamaño real 27 cm X 18 cm). La decisión de pintar las rocas se tomó con el fin de permitir mayor claridad en el movimiento de las partículas, y facilitar la medición de la distancia recorrida y observar el posible choque con las estructuras de contención y disipación presentes en el canal. Se destaca que se seleccionaron los tres tamaños arriba mencionados, por ser los más representativos de acuerdo con la granulometría realizada.
- **Selección, diseño y elaboración de las alternativas a evaluar.** Se


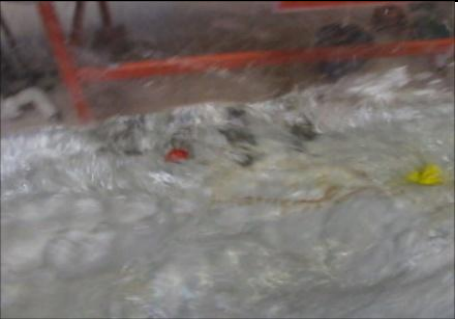


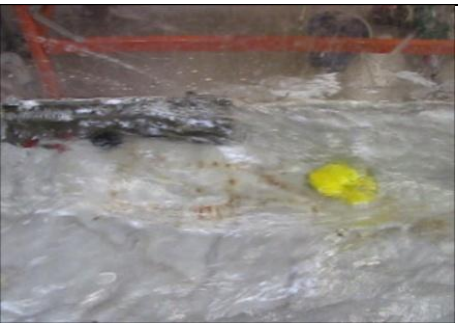
seleccionaron tres alternativas a estudiar, de acuerdo a su capacidad de disipación de energía, para determinar si el movimiento de rocas de gran tamaño durante las crecientes son las que está causando el deterioro progresivo en el área.



- En la Tabla 3 se muestra una secuencia fotográfica de la modelación física, los instrumentos empleados para la toma de datos, el funcionamiento del modelo con las rocas a escala.

Tabla 3. Registro fotográfico del proceso de modelado físico.

PASO	DETALLE	FOTOGRAFÍA
1	Canal abierto donde se construyó el modelo hidráulico, perteneciente al Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de La Salle.	

2	Material escalado pintado de colores para su diferenciación.	
3	Depósito de agua (almacenamiento).	
4	Ingreso de agua al modelo.	
5	Modelo en funcionamiento con los bloques escalados de mayor tamaño (amarillo).	

6	Modelo en funcionamiento con los bloques de tamaño medio (negro).	
7	Modelo en funcionamiento con los bloques de tamaño pequeño (rojo).	
8	Modelo en funcionamiento con todos bloques.	
9	Modelo en funcionamiento con muro de contención.	
10	Modelo en funcionamiento con gavión.	

11	Modelo en funcionamiento con espolones.	
12	Modelo en funcionamiento con muro, espilones y el material escalado.	

5.2.3.Fase 3. Experimentación

- Recopilación de información del experimento.** Se realizó un aforo volumétrico para asegurar el cumplimiento del caudal escalado máximo calculado, se realizaron tomas de datos con las partículas elegidas para el proyecto, coloreadas para diferenciar el movimiento entre ellas y la fuerza de arrastre, caracterizando el movimiento y hallando la fuerza de impacto máximo que genera la posible afectación, se registraron los tiempos que tardaba en recorrer el modelo cada roca, o, si en su defecto la roca no atravesaba todo el modelo, se medía la distancia recorrida por la misma, el proceso se repetía cinco veces para cada roca. De la misma manera se midió el ángulo que forma el recorrido de la roca con la estructura durante el choque. Para efectos

prácticos se presumió una colisión perfectamente inelástica, teniendo en cuenta que bajo estas condiciones se genera la avería máxima de una estructura.

- **Ajuste hidráulico del modelo.** La modelación hidráulica se realizó, buscando simular de la manera más exacta posible al modelo real.

5.2.4. Fase 4. Análisis y publicación de resultados

- **Análisis de los resultados obtenidos por medio de la experimentación y la observación.** Con la recopilación de datos experimentales, se obtuvo la fuerza de impacto máxima, el arrastre generado en el modelo y se determinó la disipación de la energía en la estructuras.

5.3. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Se diseñó el proyecto para ser ejecutado en 102 días que se distribuyeron de la siguiente manera:

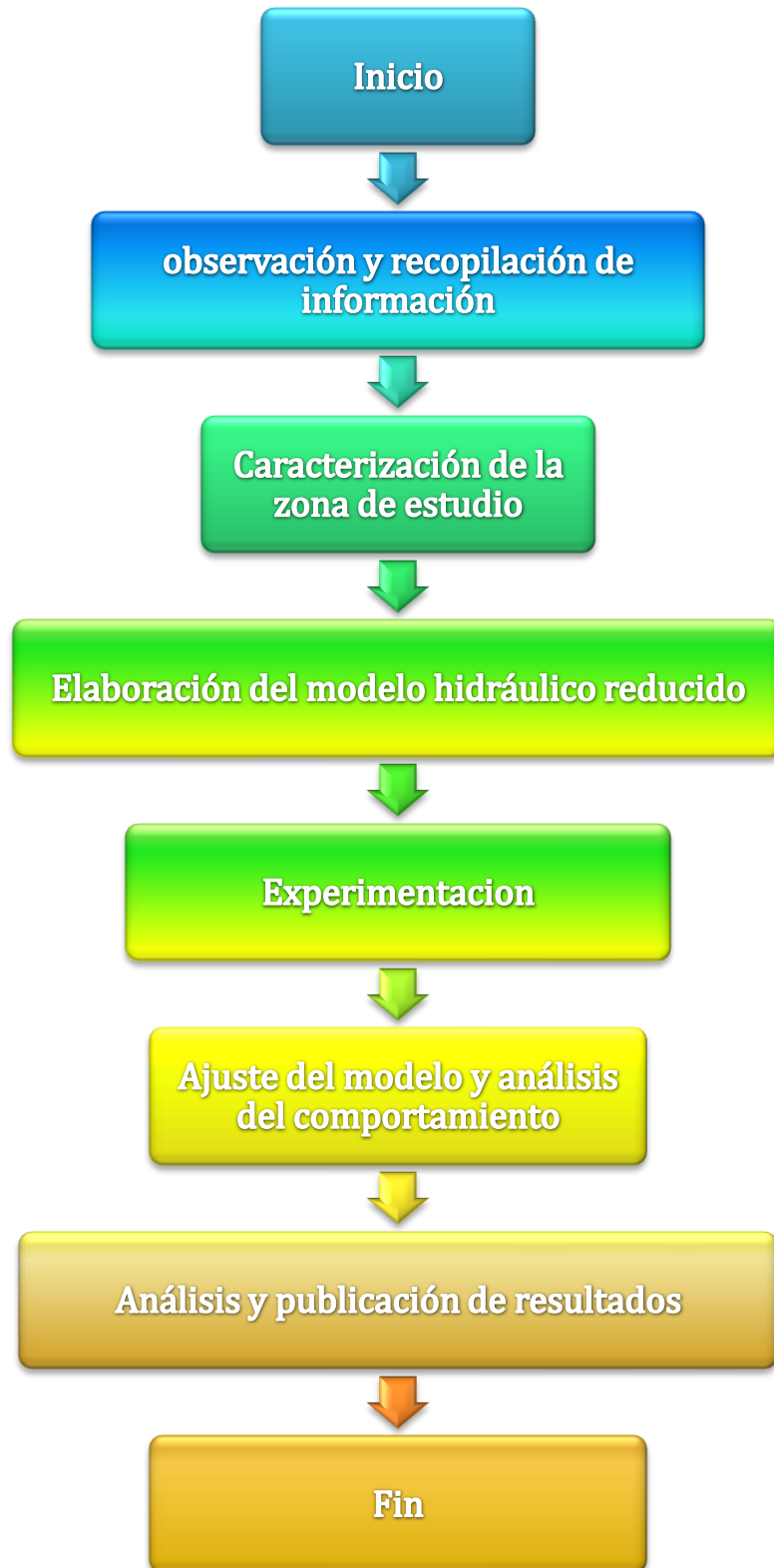
- 29 días para búsqueda de información geográfica y meteorológica de la zona.

- Diseño y construcción del modelo hidráulico: 4 días para la determinación y selección de materiales, 11 días en el diseño y construcción del modelo, y 8 días en la adecuación del modelo.
- La experimentación y toma de datos 15, análisis de resultados 25 días.

Las etapas teórico practica se desarrollarán de manera simultánea, el cronograma detallado se presenta en el Anexo 3.

En la Imagen 11 se presenta el procedimiento seguido en el desarrollo del proyecto, mediante un diagrama de flujo.

Imagen 11. Diagrama de flujo del proceso de este proyecto.



5.4. RECURSOS UTILIZADOS

Para desarrollar el proyecto se necesitaron recursos institucionales a continuación mencionados:

- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM).

- Universidad de La Salle, Colombia.

- ❖ Laboratorio de hidráulica.

- ❖ Biblioteca.

- ❖ Sala de sistemas.

- ❖ Laboratorio de suelos.

El presupuesto total de la inversión y los cuadros detallados de los recursos requeridos, se puede consultar en el Anexo 4.

5.5. ALCANCE

Este modelo se aproxima a la realidad de los eventos naturales presentados en el lugar de estudio, por lo tanto, el comportamiento esperado es comparable con los métodos usados actualmente. Se pretende dar una primera idea de las soluciones que pueden aplicarse a futuro.

La observación directa y los modelos a escala permiten analizar de manera más acertada los fenómenos físicos, que representarlos con modelos matemáticos.

5.6. LIMITACIÓN

Aunque los modelos a escala presentan una gran proximidad con los fenómenos a escala real, se encuentran aún variables hidroclimatológicas que afectan en gran medida los comportamientos. De la misma manera, el estudio de este fenómeno sólo en condiciones ambientales alteradas sesgará la cantidad de resultados y por lo tanto su posterior análisis.

6. TRABAJO INGENIERIL

En este capítulo se detalla la labor realizada por el investigador para alcanzar los objetivos del proyecto.

6.1. ESCALAS GEOMÉTRICAS

De acuerdo con las dimensiones del tramo a estudiar y el tamaño del canal en el cual se construyó el modelo (propiedad del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de La Salle) se determinó trabajar con una escala geométrica horizontal de 1:100, la cual se calculó utilizando la ecuación (11):

$$E_x = \Delta X_R / \Delta X_M \quad (11)$$

Donde:

E_x : Escala geométrica horizontal.

ΔX_R : Longitud del tramo a trabajar medido en campo.

ΔX_M : Longitud del tramo medido en el modelo.

Remplazando en (11):

$$E_x = 50 \text{ m} / 0,5 \text{ m}$$

$$E_x = 1 : 100$$

Para calcular la escala geométrica vertical, se utilizó la ecuación (12) y se obtuvo una escala en y de 1:30.

$$E_y = \Delta H_R / \Delta H_M \quad (12)$$

Donde:

E_y : Escala geométrica vertical.

ΔH_R : Diferencia de alturas límite en el tramo a trabajar medido en campo.

ΔH_M : Diferencia de alturas límite en el tramo medido en el modelo.

Remplazando en (12):

$$E_y = 3,0 \text{ m} / 0,1 \text{ m}$$

$$E_y = 1 : 30$$

Para determinar la escala del diámetro de las partículas se empleó la ecuación (13), la cual arrojó como resultado una escala de 1:10.

$$E_D = D_R / D_M \quad (13)$$

Donde:

E_D : Escala del diámetro de las partículas.

D_R : Diámetro real de las partículas que transporta el río en estudio.

D_M : Diámetro de las partículas a utilizar en el modelo.

Remplazando en (13):

$$E_D = 0,5 \text{ m} / 0,05 \text{ m}$$

$$E_D = 1 : 10$$

6.2. CAUDAL DEL MODELO

Se decidió trabajar con el caudal máximo del río, dato obtenido de la estación meteorológica 2E+06 Tobia - Cundinamarca, latitud 507, longitud 7426, elevación 620 msnm, tipo de estación LG, entidad 1, región 11 Bogotá, municipio de Nimaima los caudales máximos³¹. La decisión de trabajar con el caudal máximo fue tomada teniendo en cuenta que son los de mayor incidencia en el deterioro de

³¹ Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM). estación meteorológica 2E+06 Tobia – Cundinamarca.2010.

las estructuras, pues aunque se presentan en menor cantidad de ocasiones, son los que mayor energía transportan, los caudales mínimos y medios no ocasionan el movimiento de bloques grandes, debido a las bajas fuerzas generadas, el caudal seleccionado fue de 113,70 m³/s (Ver Anexo 5), para calcular el caudal del modelo se utilizó la ecuación (4) tomada del libro de Juan Saldarriaga:

$$E_Q = Q_D / Q_M \quad (14)^{32}$$

Donde

E_Q = Escala del caudal

Q_D = Caudal de diseño

Q_M = Caudal del modelo

Para calcular la escala del caudal se aplicaron las teorías del criterio de similitud de Froude, garantizando que se cumpla lo siguiente: El fluido en el río y en el modelo son comunes y los experimentos son realizados bajo las mismas fuerzas gravitacionales.

$$g_R = 1 * v_R = 1$$

Por lo tanto, se tienen las siguientes condiciones de similitud:

32 SALDARRIAGA, Juan. Modelación en Hidráulica, notas de clase. Bogotá D.C. Universidad de los Andes, 2005. Página 52.

$$F = U / (g * h)^{1/2} \rightarrow E_U = E_Y^{1/2}$$

A partir de esto se tiene:

$$t = 1 / U \rightarrow E_t = E_Y / E_U = E_Y^{1/2}$$

$$Q = U * A \rightarrow E_Q = E_U * E_A = E_Y^{5/2}$$

Se obtiene la ecuación (15):

$$E_Q = E_Y^{5/2} \quad (15)^{33}$$

Reemplazando en la ecuación (15):

$$E_Q = 30^{5/2}$$

$$E_Q = 1 : 4930$$

Se reemplaza E_Q en la ecuación (14) y se obtiene:

$$Q_M = 113,7 \text{ m}^3/\text{s} / 4930 = 0,023 \text{ m}^3/\text{s}$$

33 Íbid.

$$Q_M = 23 \text{ L / s}$$

6.3. ESCALA DEL PESO DE LAS PARTÍCULAS

La densidad no se escaló, por que el fluido del modelo tiene la misma densidad que el fluido real (agua). Para escalar la densidad se requeriría cambiar el fluido, lo cual sería muy costoso y peligroso, debido a que los líquidos con densidades menores a la del agua, son muy volátiles, como el alcohol etílico. Por lo tanto, la escala de la masa será:

$$E_M = E_\rho * E_D^3$$

Donde:

E_M = Escala de la masa.

E_ρ = Escala de la densidad.

E_D = Escala del diámetro de las partículas.

$$E_D = 10^3 = 1 : 1.000$$

6.4. LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA

Se realizó un levantamiento topográfico de la zona afectada en el cual se determinó una profundidad de 115 cm en promedio y la sección transversal en el sector, para así poder representar a escala en un plano (ver Anexo 6), las curvas de nivel, construcciones, la vía y otros detalles del lugar. A partir de una batimetría se determinaron las partes con mayor profundidad del río, con esta información se inició la construcción del modelo hidráulico a escala reducida. La batimetría utilizada en este proyecto se hizo en sociedad con las integrantes del grupo que desarrolló el proyecto de grado “ESTUDIO DE LAS TEORÍAS DE ARRASTRE DE FONDO SOBRE EL RIO NEGRO EN UN TRAMO DE 100M AGUAS ARRIBA DEL PUENTE TOBIA LA MONJA MEDIANTE UN MODELO FÍSICO”, debido a que el tramo de estudio era el mismo.

6.5. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO A ESCALA REDUCIDA

Con el levantamiento topográfico se inició la construcción del modelo a escala 1:100, esta escala se tomó teniendo en cuenta las dimensiones del canal de trabajo, como se explica en el numeral 6,1 de este documento. Las dimensiones del canal en mención son: 50 cm de ancho, 50 cm de altura, y 300 cm de largo, con paredes en acrílico transparente. Se creó el modelo en poliestireno, (ver Fotografía 4), representando las curvas de nivel cada 10 mm.

Fotografía 4. Modelo de poliestireno.



El modelo se impermeabilizó con Sikafill, (ver Fotografías 5 y 6), luego se introdujo en el canal (ver Fotografía 7). El caudal escalado fue suministrado por medio de bombas hidráulicas para obtener el caudal máximo con el que se trabajó.

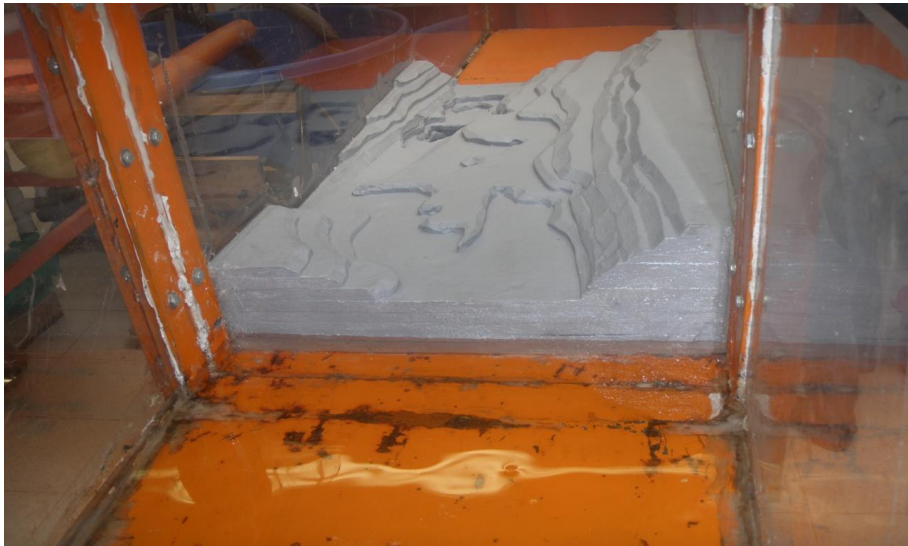
Fotografía 5. Impermeabilizado del modelo.



Fotografía 6. Modelo impermeabilizado con sikafill.



Fotografía 7. Modelo introducido y pegado en el canal.



6.6. MATERIAL

Durante la visita realizada, se realizó un sondeo de los tamaños de rocas existentes en el área. Se eligió un área de 15 m X 15 m y se hizo un conteo de las rocas y sus tamaños, (ver Fotografías 8 y 9). Las rocas de gran tamaño fueron contadas por aparte y las de tamaño pequeño fueron clasificadas por medio de una granulometría con muestras aleatorias. Los resultados de la granulometría se muestran en el Anexo 7, entre tanto que en la Tabla 4 se presentan los resultados de las rocas de gran tamaño y el tamaño del material escalado utilizado en el experimento. Para el proyecto se eligieron los tres tamaños más representativos y a estos se les realizó una escala de tamaño y peso, por el método de Buninghas descrito en el libro Operaciones Unitarias En Ingeniería de Brown.

Tabla 4. Tamaño y porcentaje de rocas de gran tamaño en el área de estudio.

Roca	Dimensiones (cm)	Porcentaje	Material escalado (in)
1	200 X 181	2 %	
2	176 X 143	4 %	
3	158 X 121	4 %	
4	134 X 103	3 %	
5	127 X 82	2 %	
6	91 X 46	4 %	
7	73 X 57	4 %	
8	56 X 31	32 %	2
9	32 X 28	18 %	1,5
10	27 X 18	21 %	1
11	23 X 15	4 %	
12	17 X 10	2 %	

El estudio individual del comportamiento de las rocas se realizó únicamente para las rocas de los porcentajes altos, pero para el análisis del comportamiento de bloque se colocaron las rocas de todos los tamaños.

Fotografía 8. Lugar del conteo de rocas.



Fotografía 9. Conteo de las rocas y sus tamaños.



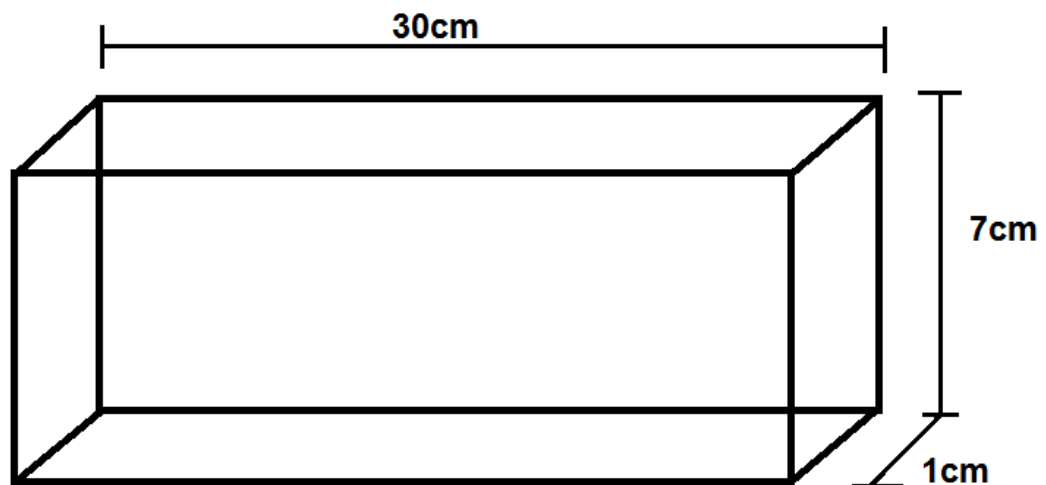
6.7. ESTRUCTURAS

Las estructuras de disipación de energía se diseñaron con una mezcla 1:2:3 cumpliendo con la granulometría, las dimensiones en alto, largo y ancho se hacen con áreas iguales, con el objeto de generar las mismas condiciones en el modelo.

6.7.1. Muro de contención

Se diseñó con dimensiones de 7,5 cm de alto, 2,4 cm de ancho, 30 cm de largo y peso de 850 g, resistencia a la compresión a los 28 días de 3000 Lb/in² ver en la Imagen 12 y en la Fotografía 10 en donde se muestra gráficamente como quedó instalado el muro de contención en el modelo escalado.

Imagen 12. Esquema tridimensional del muro de contención.



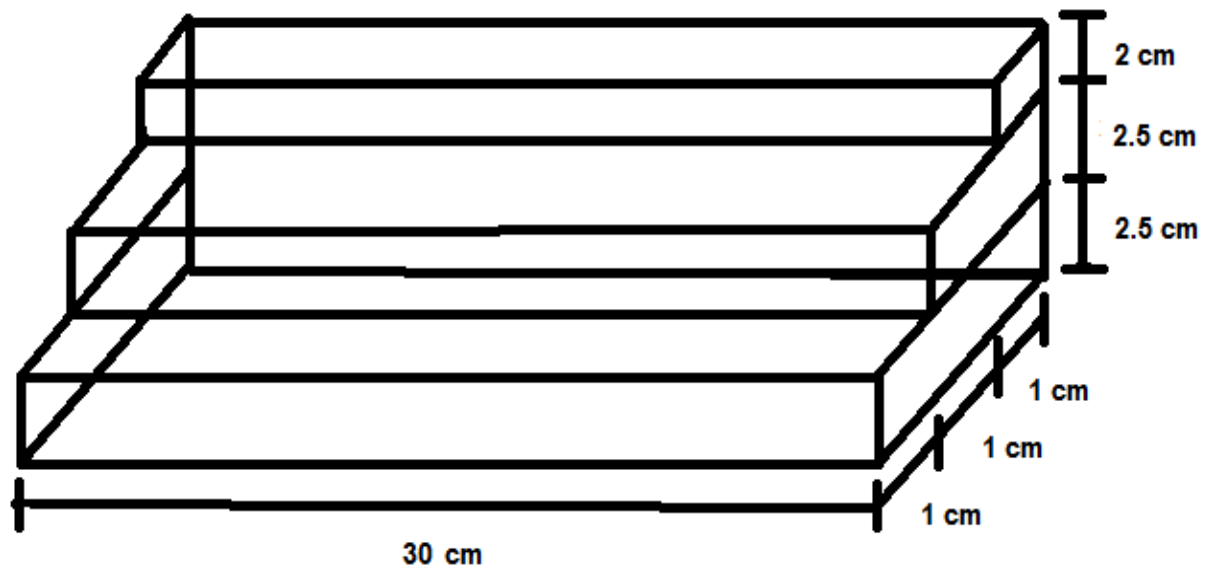
Fotografía 10. Muro de contención instalado en el modelo escalado.



6.7.2. Muro tipo gavión

Esta estructura se seleccionó por su gran capacidad de disipar energía, ya que su forma escalonada permite generar una detención de los bloques pausadamente, sus dimensiones se registran en la Imagen 13, y en la Fotografía 11 se muestra gráficamente como quedó instalado el muro tipo gavión en el modelo escalado. El peso de la estructura fue de 813 g.

Imagen 13. Esquema tridimensional del muro tipo gavión.



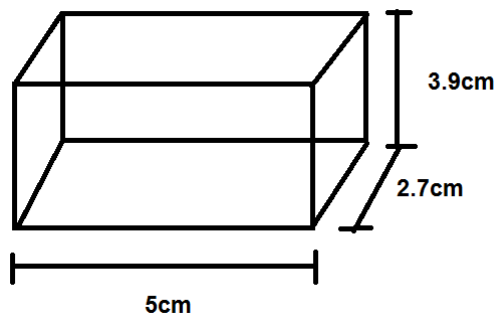
Fotografía 11. Muro tipo gavión instalado en el modelo escalado.



6.7.3. Espolones

Se diseñaron cuatro espolones para ser ubicados en el tramo de trabajo, con las dimensiones de 3,9 cm de alto, 2,7 cm de ancho, 5,0 cm de largo, con una resistencia a los 28 días de 3000 Lb/in² (Ver Imagen 14). Y en la Fotografía 12 se presenta la ubicación de los espolones en el modelo distanciados entre sí 6,0 cm, que en la realidad corresponden a 6,0 m.

Imagen 14. Esquema tridimensional de un espolón.



Fotografía 12. Espolones instalados en el modelo escalado.



6.8. VOLUMEN Y DENSIDAD DE LAS ROCAS

Para obtener el volumen de las rocas escaladas con las cuales se realizaron los estudios, se utilizó el método volumétrico de Eureka-Can, con el uso de la ecuación (16) para hallar el volumen de cada roca.

$$V = M / \rho \quad (16)$$

Donde:

V = Volumen del cuerpo en estudio.

M = Masa del cuerpo en estudio.

ρ = Densidad del cuerpo en estudio.

Tabla 5. Volumen calculado para cada roca.

Roca	Masa (g)	ρ_{H_2O} (g/cm ³)	Volumen Roca (cm ³)	Pasa tamiz
1	52,4	0,981	53,41	2"
2	31,8	0,981	32,42	2"
3	35,3	0,981	35,98	2"
4	26,9	0,981	27,42	2"
5	16,1	0,981	16,41	2"
6	24,0	0,981	24,46	2"
7	8,9	0,981	9,07	1"
8	9,9	0,981	10,09	1"
9	12,1	0,981	12,33	1"
10	5,9	0,981	6,01	3/4"
11	5,9	0,981	6,01	3/4"
12	3,7	0,981	3,77	3/4"

La densidad de las rocas se calculó también con la ecuación (16)

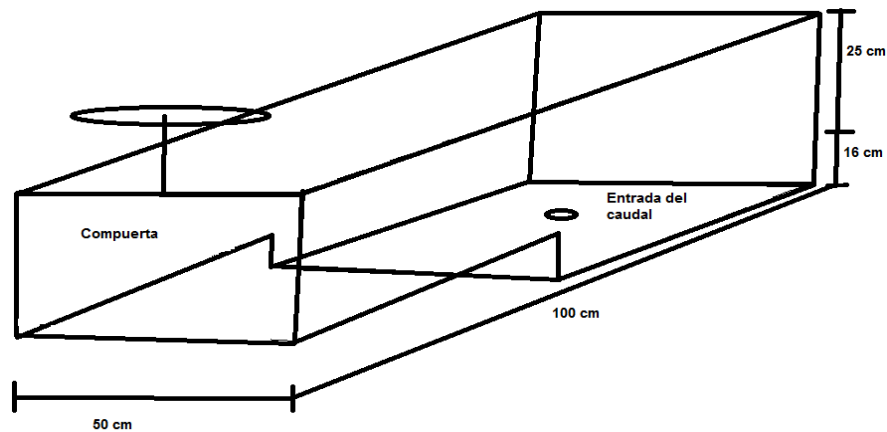
Tabla 6. Densidad calculada para cada roca.

Roca	Masa roca (g)	Volumen (cm ³)	Densidad roca (g/cm ³)
1	157,9	53,4149	2,9561
2	83,2	32,4159	2,5666
3	87,1	35,9837	2,4205
4	65,8	27,4210	2,3996
5	42,5	16,4118	2,5896
6	70,2	24,4648	2,8694
7	29,3	9,0724	3,2296
8	25	10,0917	2,4773
9	32	12,3344	2,5944
10	14	6,0143	2,3278
11	14	6,0143	2,3278
12	9,6	3,7717	2,5453

6.9. AFORO DEL CAUDAL DE ENTRADA

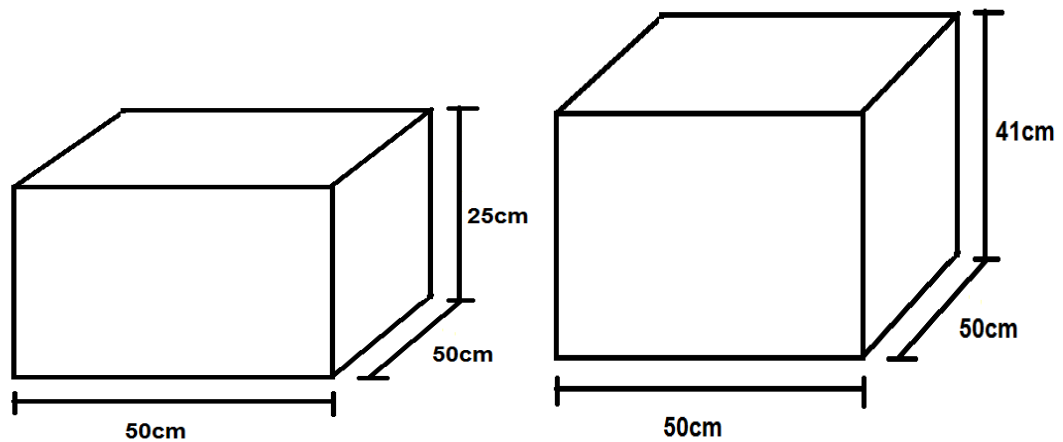
El caudal de entrada fue medido por medio del método volumétrico para aforo de caudales. Se uso una compuerta para cerrar el flujo de agua y así poder tomar el tiempo tardado en llenarse completamente la sección del canal, presentado en la Imagen 15, con estos tiempos y el volumen se determino el caudal, ver Tabla 7.

Imagen 15. Sección del canal completo para el aforo volumétrico.



Para el cálculo del volumen del canal utilizado se hizo necesario dividir la sección en dos debido a su irregularidad geométrica, las dos secciones tiene las dimensiones presentadas en la Imagen 16.

Imagen 16. Secciones del canal para el aforo volumétrico.



De la imagen anterior se puede determinar el volumen de la sección completa (ecuación 17).

$$V_T = V_1 + V_2 \quad (17)$$

$$V_T = (0,50 * 0,50 * 0,25) + (0,50 * 0,50 * 0,41) \text{ m}^3$$

$$V_T = 0,165 \text{ m}^3$$

Tabla 7. Caudal de entrada.

Aforo	Tiempo (s)	V_T de la sección del canal	Caudal (L/s)
1	7,45	0,165 m ³	22,15
2	7,32	0,165 m ³	22,54
3	7,45	0,165 m ³	22,15
4	7,33	0,165 m ³	22,51
5	6,77	0,165 m ³	24,37
6	6,91	0,165 m ³	23,88
7	6,65	0,165 m ³	24,81
8	7,31	0,165 m ³	22,57
9	7,42	0,165 m ³	22,24
10	7,15	0,165 m ³	23,08
Promedio			23,03

Por lo tanto el caudal de entrada al modelo es de 23,03 L/s, caudal requerido, de acuerdo con el numeral 6,2 del presente informe.

6.10. PRUEBAS DE LABORATORIO

En el proyecto se realizaron un total de 132 pruebas con las rocas escaladas, y sus respectivos colores, para las rocas amarillas pasa tamiz 2", negras pasa tamiz 1.5", rojas pasa tamiz 1", a continuación se muestra un en las figuras 17, 18,19 una secuencia de la toma de datos realizados.

Imagen 17. Secuencia de toma de datos para la estructura muro.

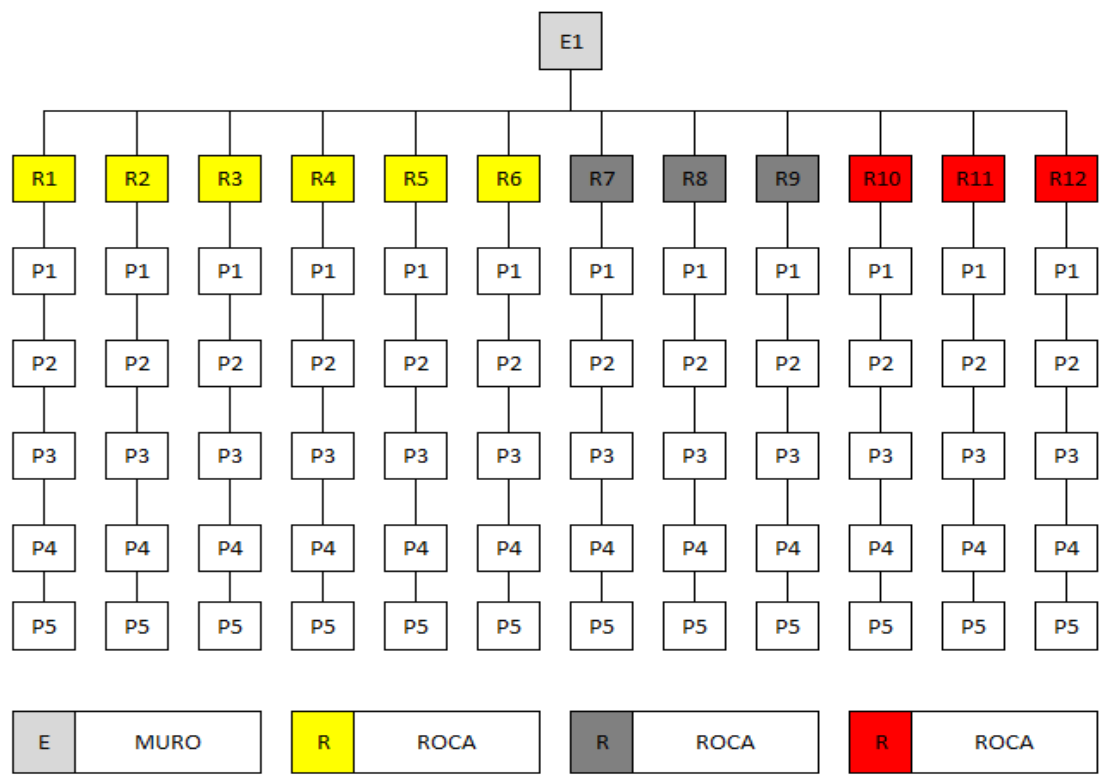


Imagen 18. Secuencia de toma de datos para la estructura gavión.

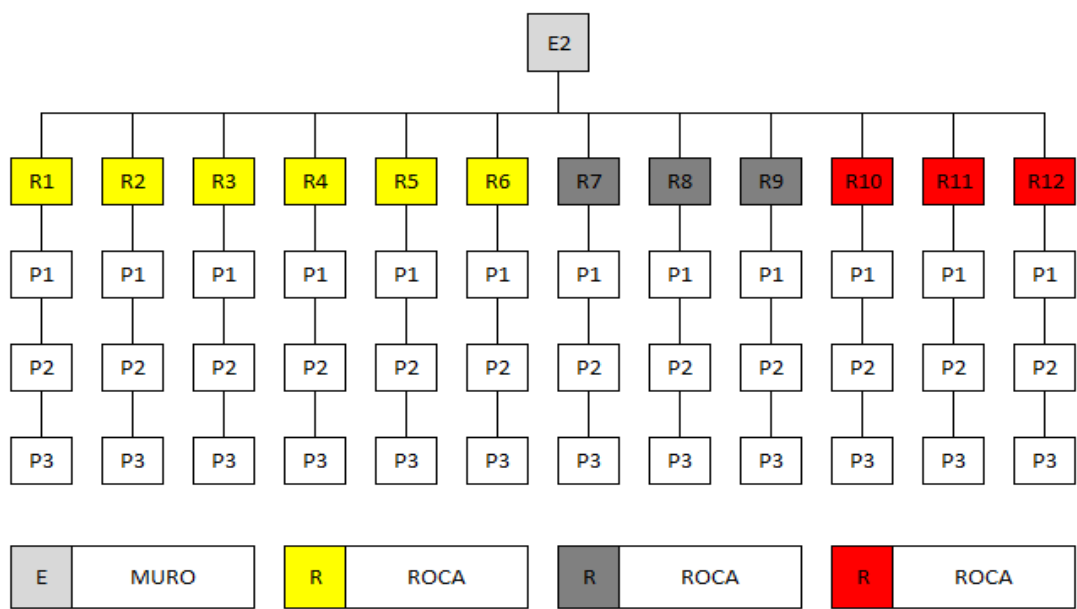
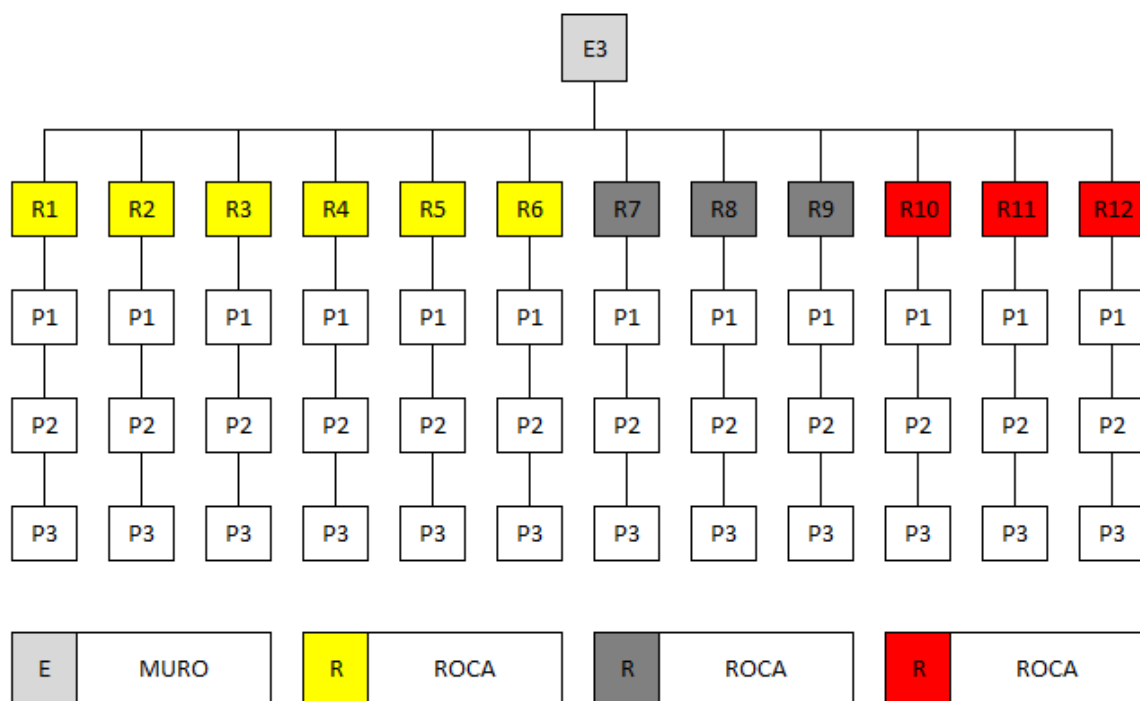


Imagen 19. Secuencia de toma de datos para la estructura espolones.



7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. RESULTADOS

Con el fin de definir los efectos generados de acuerdo a lo experimentado se obtuvieron los resultados que a continuación se presentan.

7.1.1. Caracterización de las partículas

Del material seleccionado de acuerdo con la granulometría, se eligieron aleatoriamente 12 rocas, 6 del tamaño mayor (de acuerdo con el porcentaje de la granulometría, 32% pasa tamiz 2", 18% pasa tamiz 1.5", 21% pasa tamiz 1"), 3 del tamaño intermedio y 3 del tamaño menor, ver fotografía 13. A estas rocas se les hizo una caracterización de las dimensiones requeridas en este experimento.

Fotografía 13. Rocas seleccionadas aleatoriamente.



La medición del área de un cuerpo irregular, es por demás, muy complicado, para efectos de practicidad se supuso que las rocas eran esféricas y de esta manera se procedió a calcular el radio(R) y el área(A) de la misma, en donde γ es el volumen de la roca.

$$R = (0,75 * \gamma * \pi)^{1/3} \quad (18)$$

$$A = 4 * \pi * R^2 \quad (19)$$

Las características de cada roca se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Características de las rocas analizadas.

Roca	Masa Roca (g)	Volumen (cm ³)	Densidad roca (g/cm ³)	Radio (m)	Área (m ²)
1	157,9	53,41	2,9561	0,0234	0,0069
2	83,2	32,41	2,5666	0,0198	0,0049
3	87,1	35,98	2,4205	0,0205	0,0053
4	65,8	27,42	2,3996	0,0187	0,0044
5	42,5	16,41	2,5896	0,0158	0,0031
6	70,2	24,46	2,8694	0,0180	0,0041
7	29,3	9,07	3,2296	0,0129	0,0021
8	25,0	10,09	2,4773	0,0134	0,0023
9	32,0	12,33	2,5944	0,0143	0,0026
10	14,0	6,01	2,3278	0,0113	0,0016
11	14,0	6,01	2,3278	0,0113	0,0016
12	9,6	3,77	2,5453	0,0097	0,0012

7.1.2. Velocidad media de cada partícula

Para cada partícula se realizaron 5 medidas de la distancia recorrida y del tiempo (para la medición del tiempo se utiliza el programa movie maker 2.6), con estos datos se obtuvo un promedio, de distancia y tiempo, para el cálculo de la velocidad de recorrido (Ver ecuación 20).

$$v = X / t \quad (20)$$

Donde:

X = Distancia recorrida por la partícula.

t = Tiempo que tarda la partícula en recorrer la distancia X.

v = Velocidad promedio de la partícula.

La Fotografía 14 presenta una partícula en movimiento a lo largo del modelo, y en la Tabla 9 se expone la velocidad promedio de cada partícula en cada una de las estructuras estudiadas.

Fotografía 14. Roca en desplazamiento por el modelo para los espolones.



Tabla 9. Velocidad promedio de cada partícula.

	Muro	Gavión	Espolón
Roca	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
1	0,3187	0,3167	0,3779
2	0,3936	0,3760	0,4504
3	0,4205	0,3890	0,3736
4	0,3834	0,4189	0,4389
5	0,4014	0,3753	0,3391
6	0,3917	0,3367	0,2766
7	0,4783	0,4239	0,4144
8	0,4699	0,4358	0,4331
9	0,4937	0,4580	0,3878
10	0,5888	0,5689	0,5475
11	0,4103	0,4802	0,4949
12	0,4148	0,5858	0,5186

7.1.3. Fuerza de impacto

La velocidad promedio de cada partícula, permite calcular la fuerza de impacto máxima de dicha partícula contra la estructura de contención. Para el cálculo de la fuerza máxima se consideró el choque de la partícula como un choque perfectamente inelástico y se utilizaron las ecuaciones (21 y 22).

$$F_X = m * (v_i * \text{Cos } \phi_i - v_f * \text{Cos } \phi_f) / \Delta t \quad (21)$$

$$F_Y = m * (v_i * \text{Sen } \phi_i - v_f * \text{Sen } \phi_f) / \Delta t \quad (22)$$

Donde:

F_X = Fuerza de impacto en X.

F_Y = Fuerza de impacto en Y.

m = Masa de la partícula.

v_i = Velocidad inicial.

v_f = Velocidad final.

ϕ_i = Ángulo inicial de choque de la partícula con la estructura.

ϕ_f = Ángulo final de choque de la partícula con la estructura.

Δt = Tiempo.

Al ser un choque perfectamente inelástico, la velocidad final es 0, por consiguiente los términos " $v_f * \text{Cos } \phi_f$ " y " $v_f * \text{Sen } \phi_f$ ", se convierten en cero, entonces las ecuaciones 21 y 22 se convierten en las ecuaciones 23 y 24 respectivamente.

$$F_X = m * (v_i * \text{Cos } \phi_i) / \Delta t \quad (23)$$

$$F_Y = m * (v_i * \text{Sen } \phi_i) / \Delta t \quad (24)$$

A continuación se muestran los resultados de fuerza de impacto obtenidos en el experimento, para cada una de las estructuras analizadas (ver Tablas 10, 11 y 12), con esta fuerza se calculó la fuerza real de impacto que ejerce una roca en el modelo real, la fuerza real es supuesta y obtenida al multiplicar la fuerza en el

modelo físico por 10^5 , factor de la escala geométrica y la escala del diámetro al cubo, debido a que la fuerza se calcula a raíz de un volumen de una roca, en una distancia recorrida. En las Fotografías 15 y 16 se muestra la secuencia de impacto de una roca.

Tabla 10. Fuerzas de impacto en el muro de contención.

Roca	Masa (kg)	v_i (m/s)	ϕ_i (°)	Tiempo (s)	F_x (N)	F_y (N)	F (N)	F Real (N)
1	0,1579	0,3187	33	0,26	0,1623	0,1054	0,1935	19354,90
2	0,0832	0,3936	33	0,26	0,1056	0,0686	0,1260	12595,20
3	0,0871	0,4205	33	0,26	0,1181	0,0767	0,1409	14086,75
4	0,0658	0,3834	33	0,26	0,0814	0,0528	0,0970	9702,97
5	0,0425	0,4014	33	0,26	0,0550	0,0357	0,0656	6561,35
6	0,0702	0,3917	33	0,26	0,0887	0,0576	0,1058	10575,90
7	0,0293	0,4783	33	0,26	0,0452	0,0294	0,0539	5390,07
8	0,0250	0,4699	33	0,26	0,0379	0,0246	0,0452	4518,27
9	0,0320	0,4937	33	0,26	0,0510	0,0331	0,0608	6076,31
10	0,0140	0,5888	33	0,26	0,0266	0,0173	0,0317	3170,46
11	0,0140	0,4103	33	0,26	0,0185	0,0120	0,0221	2209,31
12	0,0096	0,4148	33	0,26	0,0128	0,0083	0,0153	1531,57

Tabla 11. Fuerzas de impacto en el muro tipo gavión.

Roca	Masa (kg)	v_i (m/s)	ϕ_i (°)	Tiempo (s)	F_x (N)	F_y (N)	F (N)	F Real (N)
1	0,1579	0,3167	33	0,26	0,1613	0,1048	0,1923	19233,18
2	0,0832	0,3760	33	0,26	0,1009	0,0655	0,1203	12033,28
3	0,0871	0,3890	33	0,26	0,1093	0,0710	0,1303	13031,26
4	0,0658	0,4189	33	0,26	0,0889	0,0577	0,1060	10601,85
5	0,0425	0,3753	33	0,26	0,0515	0,0334	0,0614	6135,44
6	0,0702	0,3367	33	0,26	0,0762	0,0495	0,0909	9090,76
7	0,0293	0,4239	33	0,26	0,0401	0,0260	0,0478	4777,07
8	0,0250	0,4358	33	0,26	0,0351	0,0228	0,0419	4190,40
9	0,0320	0,4580	33	0,26	0,0473	0,0307	0,0564	5636,81
10	0,0140	0,5689	33	0,26	0,0257	0,0167	0,0306	3063,52
11	0,0140	0,4802	33	0,26	0,0217	0,0141	0,0259	2585,94
12	0,0096	0,5858	33	0,26	0,0181	0,0118	0,0216	2163,02

Fotografía 15. Secuencia de impacto de una roca en el muro de contención.

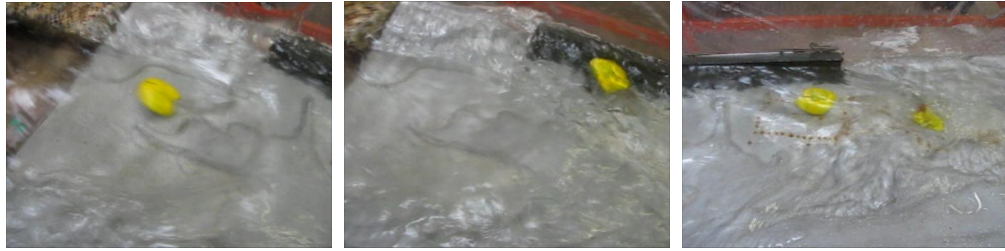


Tabla 12. Fuerzas de impacto en los espolones.

Roca	Masa (kg)	v_i (m/s)	ϕ_i (°)	Tiempo (s)	F_x (N)	F_y (N)	F (N)	F Real (N)
1	0,1579	0,3779	33	0,26	0,1925	0,1250	0,2295	22949,18
2	0,0832	0,4504	33	0,26	0,1209	0,0785	0,1441	14411,33
3	0,0871	0,3736	33	0,26	0,1050	0,0682	0,1252	12515,02
4	0,0658	0,4389	33	0,26	0,0931	0,0605	0,1111	11106,79
5	0,0425	0,3391	33	0,26	0,0465	0,0302	0,0554	5543,13
6	0,0702	0,2766	33	0,26	0,0626	0,0407	0,0747	7467,71
7	0,0293	0,4144	33	0,26	0,0392	0,0254	0,0467	4669,99
8	0,0250	0,4331	33	0,26	0,0349	0,0227	0,0416	4164,15
9	0,0320	0,3878	33	0,26	0,0400	0,0260	0,0477	4772,37
10	0,0140	0,5475	33	0,26	0,0247	0,0161	0,0295	2948,15
11	0,0140	0,4949	33	0,26	0,0223	0,0145	0,0266	2664,80
12	0,0096	0,5186	33	0,26	0,0161	0,0104	0,0191	1914,92

Fotografía 16. Rocas en conjunto impactando contra los espolones.



7.1.4. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre se calculó con la ecuación (9) presentada en el numeral 4.2 de este informe.

La fuerza real es supuesta y obtenida al multiplicar la fuerza en el modelo físico por 10^5 , factor de la escala geométrica y la escala del diámetro al cubo, debido a que la fuerza se calcula a raíz de un volumen de una roca, en una distancia recorrida.

$$F = 0,5 * \rho * A * v^2 \quad (9)$$

Tabla 13. Fuerzas de arrastre en el muro.

Roca	v_i (m/s)	ρ_{H_2O} (Kg/m ³)	Área (m ²)	Fuerza de Arrastre (N)	Fuerza Arrastre Real (N)
1	0,3187	1000	0,0069	0,3504	35041,54
2	0,3936	1000	0,0049	0,3796	37955,64
3	0,4205	1000	0,0053	0,4686	46857,37
4	0,3834	1000	0,0044	0,3234	32339,02
5	0,4014	1000	0,0031	0,2497	24973,90
6	0,3917	1000	0,0041	0,3145	31452,92
7	0,4783	1000	0,0021	0,2402	24020,94
8	0,4699	1000	0,0023	0,2539	25392,69
9	0,4937	1000	0,0026	0,3169	31686,16
10	0,5888	1000	0,0016	0,2773	27734,84
11	0,4103	1000	0,0016	0,1347	13467,69
12	0,4148	1000	0,0012	0,1032	10323,54

Tabla 14. Fuerzas de arrastre en el muro tipo gavión.

Roca	v_i (m/s)	ρ_{H_2O} (Kg/m ³)	Área (m ²)	Fuerza de Arrastre (N)	Fuerza Arrastre Real (N)
1	0,3167	1000	0,0069	0,3460	34603,12
2	0,3760	1000	0,0049	0,3464	34637,12
3	0,3890	1000	0,0053	0,4010	40100,07
4	0,4189	1000	0,0044	0,3860	38604,99
5	0,3753	1000	0,0031	0,2183	21831,76
6	0,3367	1000	0,0041	0,2324	23240,21
7	0,4239	1000	0,0021	0,1887	18867,58
8	0,4358	1000	0,0023	0,2184	21840,99
9	0,4580	1000	0,0026	0,2727	27269,32
10	0,5689	1000	0,0016	0,2589	25891,78
11	0,4802	1000	0,0016	0,1845	18447,36
12	0,5858	1000	0,0012	0,2059	20589,70

Tabla 15. Fuerzas de arrastre en los espolones.

Roca	v_i (m/s)	ρ_{H_2O} (Kg/m ³)	Área (m ²)	Fuerza de Arrastre (N)	Fuerza Arrastre Real (N)
1	0,3779	1000	0,0069	0,4927	49268,90
2	0,4504	1000	0,0049	0,4970	49700,74
3	0,3736	1000	0,0053	0,3699	36987,89
4	0,4389	1000	0,0044	0,4238	42379,31
5	0,3391	1000	0,0031	0,1782	17823,27
6	0,2766	1000	0,0041	0,1568	15684,05
7	0,4144	1000	0,0021	0,1803	18031,37
8	0,4331	1000	0,0023	0,2157	21571,20
9	0,3878	1000	0,0026	0,1955	19550,55
10	0,5475	1000	0,0016	0,2398	23980,50
11	0,4949	1000	0,0016	0,1959	19594,08
12	0,5186	1000	0,0012	0,1614	16136,76

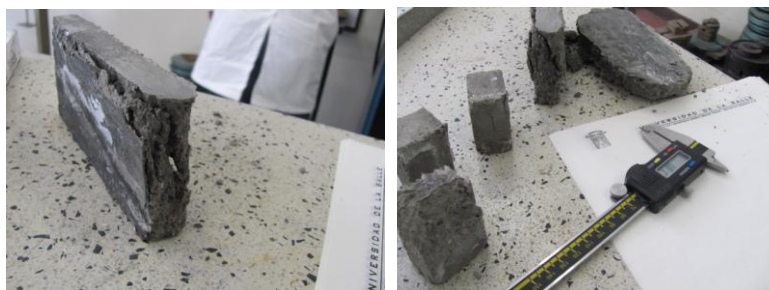
7.1.5. Resistencia a la compresión de las estructuras

A las estructuras construidas se les realizó un ensayo para corroborar su resistencia a la compresión en la prensa universal Versa Tester perteneciente al laboratorio de estructuras de la Universidad de La Salle, y se demostró que el concreto utilizado para la construcción de las pruebas, presentó resistencias superiores a los 3000 Psi (Ver Tabla 16).

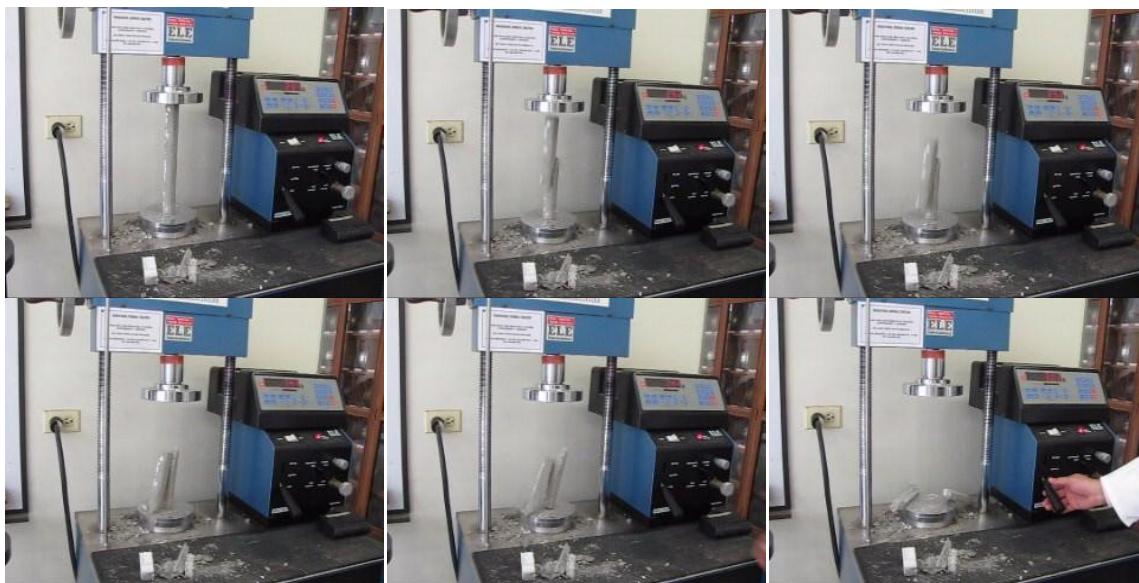
Tabla 16. Resistencia a la compresión de las estructuras analizadas.

Estructura	Dimensiones (mm)	Carga (KN)	Área (m ²)	Presión (MPa)	Presión (Psi)
Espolón 1	27.37x38.18	24,70	0,001045	23,64	3428,21
Espolón 2	39.18x26.18	21,40	0,001026	20,86	3025,94
Espolón 3	31.94x26.43	20,10	0,000844	23,81	3453,38
Espolón 4	29.77x26.54	15,70	0,000790	19,87	2882,04
Muro perfil	21.40x150.55	86,50	0,003222	26,85	3894,06
Muro acostado	71.15x135.48	241,44	0,009639	25,05	3632,79
Gavión a largo	22.34x29.03	15,10	0,000649	23,28	3376,97
Gavión acostado	150x20	64,13	0,003000	21,38	3100,18

Fotografía 17. Estructuras falladas a compresión.



Fotografía 18. Secuencia de falla a compresión.



7.2. RESULTADOS ESPERADOS VS. RESULTADOS OBTENIDOS

Los muros contruidos para contener los daños ocasionados al terreno por parte del agua en el Río Negro, presentan deterioro notable en su estructura. En el modelo construido, el deterioro se pudo constatar a través de la observación detallada antes y después del experimento, en las estructuras quedan huellas de los impactos producidos por los bloques, después de tres pruebas realizadas, estas duraron un minuto y medio.

La socavación presentada en el sector del Río Negro estudiado, no se puede demostrar en el modelo escalado, debido a que esta socavación se presenta por el flujo constante de agua y el transcurrir del tiempo, entre tanto que el modelo no

permite simular este proceso, pues generaría costos muy altos el mantener el modelo en funcionamiento constante.

Igualmente, para lograr un deterioro notable, las estructuras deberían ser sometidas a un ataque constante y en un periodo de tiempo excesivamente largo y por consiguiente costoso, por lo cual, no se pudo realizar, pero si se demostró que existe este deterioro, teniendo en cuenta las magnitudes calculadas de la fuerza de impacto de los bloques en las estructuras.

Las fuerzas de impacto generan presiones sobre las estructuras, las cuales se calcularon asumiendo el área de impacto como el área de un círculo de radio igual al radio de la partícula, y se resume en las Tablas 17, 18 y 19.

Tabla 17. Presiones de impacto de las partículas en el muro de contención.

Roca	v_i (m/s)	Radio (m)	Área (m ²)	F (N)	Presión (Pa)	Presión (mmH ₂ O)	Presión Real (mH ₂ O)
1	0,3187	0,0234	0,001720	0,1935	112,49	11	115
2	0,3936	0,0198	0,001232	0,1260	102,30	10	104
3	0,4205	0,0205	0,001320	0,1409	106,72	11	109
4	0,3834	0,0187	0,001099	0,0970	88,30	9	90
5	0,4014	0,0158	0,000784	0,0656	83,64	9	85
6	0,3917	0,0180	0,001018	0,1058	103,94	11	106
7	0,4783	0,0129	0,000523	0,0539	103,10	11	105
8	0,4699	0,0134	0,000564	0,0452	80,13	8	82
9	0,4937	0,0143	0,000642	0,0608	94,64	10	96
10	0,5888	0,0113	0,000401	0,0317	79,02	8	81
11	0,4103	0,0113	0,000401	0,0221	55,09	6	56
12	0,4148	0,0097	0,000296	0,0153	51,76	5	53

Tabla 18. Presiones de impacto de las partículas en el muro tipo gavión.

Roca	v_i (m/s)	Radio (m)	Área (m ²)	F (N)	Presión (Pa)	Presión (mmH ₂ O)	Presión Real (mH ₂ O)
1	0,3167	0,0234	0,001720	0,1923	111,79	11	114
2	0,3760	0,0198	0,001232	0,1203	97,68	10	100
3	0,3890	0,0205	0,001320	0,1303	98,69	10	101
4	0,4189	0,0187	0,001099	0,1060	96,49	10	98
5	0,3753	0,0158	0,000784	0,0614	78,29	8	80
6	0,3367	0,0180	0,001018	0,0909	89,30	9	91
7	0,4239	0,0129	0,000523	0,0478	91,43	9	93
8	0,4358	0,0134	0,000564	0,0419	74,28	8	76
9	0,4580	0,0143	0,000642	0,0564	87,79	9	89
10	0,5689	0,0113	0,000401	0,0306	76,28	8	78
11	0,4802	0,0113	0,000401	0,0259	64,56	7	66
12	0,5858	0,0097	0,000296	0,0216	73,07	7	74

Tabla 19. Presiones de impacto de las partículas en los espolones.

Roca	v_i (m/s)	Radio (m)	Área (m ²)	F (N)	Presión (Pa)	Presión (mmH ₂ O)	Presión Real (mH ₂ O)
1	0,3779	0,0234	0,001720	0,2295	133,41	14	136
2	0,4504	0,0198	0,001232	0,1441	117,00	12	119
3	0,3736	0,0205	0,001320	0,1252	94,83	10	97
4	0,4389	0,0187	0,001099	0,1111	101,13	10	103
5	0,3391	0,0158	0,000784	0,0554	70,64	7	72
6	0,2766	0,0180	0,001018	0,0747	73,39	7	75
7	0,4144	0,0129	0,000523	0,0467	89,33	9	91
8	0,4331	0,0134	0,000564	0,0416	73,75	8	75
9	0,3878	0,0143	0,000642	0,0477	74,25	8	76
10	0,5475	0,0113	0,000401	0,0295	73,54	7	75
11	0,4949	0,0113	0,000401	0,0266	66,31	7	68
12	0,5186	0,0097	0,000296	0,0191	64,62	7	66

De las Tablas 17, 18 y 19 se puede observar que las estructuras deben resistir fuerzas y presiones muy altas, similares a las producidas por columnas de agua de gran altura, por lo tanto, se requiere un diseño con una resistencia a la compresión óptima.

7.3. PORCENTAJE DE ERROR

No es posible calcular el error cometido en el cálculo de las fuerzas de impacto, fuerzas de arrastre y presiones, debido a que no existe un valor teórico de las fuerzas que afectan el sistema real estudiado. Para el cálculo del error en la medición de la velocidad, se asumió como valor real el promedio de los datos medidos. Los porcentajes de error obtenidos se presentan en la Tabla 20, en esta tabla se puede observar que el error cometido es muy alto debido a que los intervalos de tiempo de los procesos de medición son muy bajos.

Tabla 20. Error absoluto de las mediciones por estructura.

	ERROR ABSOLUTO
Muro de contención	20,42 %
Muro tipo gavión	18,60 %
Espolones	22,15 %
Promedio Total	20,39 %

7.4. RECOMENDACIONES

- En futuros proyectos de investigación, para determinar la fuerza de empuje de un líquido sobre un cuerpo sólido, se deben tener en cuenta dos aspectos importantes que se reflejaron en este experimento, si la partícula está totalmente sumergida la fuerza de empuje es igual el peso y no se presenta

fricción, en el caso de la partícula parcialmente sumergida esta será la fuerza normal mas el coeficiente de rugosidad, en este caso si se presenta fricción.

- Se exhorta al programa de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle, en especial al área de Hidráulica a continuar con esta investigación, incluyendo nuevos elementos y variables, e instrumentos de mayor precisión para la toma de las medidas.
- Entre las variables que se deben incluir para futuras investigaciones, se considera recomendable incluir la incidencia del tráfico pesado en la vía, con el objeto de verificar las vibraciones producidas por los vehículos de carga y su influencia en el deterioro al terreno y a las estructuras de contención.
- Otra variable que se recomienda no despreciar en futuras investigaciones es la deforestación causada por las comunidades aledañas al área de influencia de la cuenca, causa de la erosión en las márgenes del río, la disminución de la capacidad de absorción del suelo y el aumento en la velocidad del flujo, generadores de mayor movimiento de bloques.
- Se recomienda actualizar los estudios hidrológicos de la zona, debido a los recientes cambios climáticos las precipitaciones podrían haber aumentado y por ende los caudales máximos de la cuenca también, generando daños no previstos en el diseño de las estructuras de contención.

CONCLUSIONES

- En el proyecto se caracterizó el movimiento de bloques de acuerdo a la velocidad y a la fuerza de impacto, encontrando los siguientes resultados: para la estructura de gavión una velocidad de recorrido 0.42 m/s, los espolones 0.41 m/s y el muro 0.43 m/s. una fuerza de impacto en promedio para todas las estructuras de 25000 N, con estos resultados se concluye que la estructura de muro de contención es la que mayor energía disipa.
- Actualmente en el sector denominado paraíso del río Negro, se encuentra un muro de contención, con visibles daños ocasionados por el movimiento de bloques, después del análisis de los ensayos de laboratorio sobre el modelo hidráulico a escala reducida, se pudo demostrar que dichos daños en la parte superior los ocasiona la fuerza de impacto generada por el bloque durante su movimiento, esto es porque adquiere la misma velocidad con la que se mueve el agua.
- Al presentarse una acumulación puntual de bloques en un río, estos actúan como una sola masa, convirtiéndose en disipadores de energía, es decir, pueden considerarse como un gavión natural, por lo tanto, para reducir el

impacto de las crecientes, se puede realizar aguas arriba de los puntos críticos, una remoción de bloques y posterior ubicación de los mismos en la sección del cauce.

- Se demostró que los bloques durante su desplazamiento, si impactan contra las estructuras de contención, generando un deterioro progresivo a las mismas, situación que se intensifica en temporadas invernales que aumentan la cantidad de crecientes súbitas y permanentes, generando el movimiento de bloques constante, aunque en ocasiones las rocas poseen recorridos paralelos a las estructuras, por lo anterior, si bien el porcentaje de impacto es alto, no se puede afirmar que es del 100%.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, la estructura que soporta las mayores energías y con mayor cantidad de disipación de la misma es el muro de contención, sean bloques de gran tamaño o pequeño, esto debido a que presenta la mayor cantidad de hullas dejadas por el impacto de los bloques, en este caso a pesar de la cantidad notorias de huellas no fue posible cuantificarlas.

BIBLIOGRAFÍA

BOTIA, Luis., JAIMES, John., RONCANCIO, Wilmar. Análisis de alternativas en un modelo hidráulico reducido para mitigar la socavación producida por el río chocho en el club el bosque Bogotá, 2008, 90p. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil.

BUSTOS BUSTOS, José Gonzalo. Plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de Pacho. Documento resumen. Pacho (Cundinamarca): Alcaldía Municipal; 2000. 56p.

CHOW, Ven Te. Hidráulica de los canales abiertos. México: Editorial Diana, 1982

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Tesis y otros programas de grado (QUINTA ACTUALIZACIÓN). Bogotá: ICONTEC, 2002.

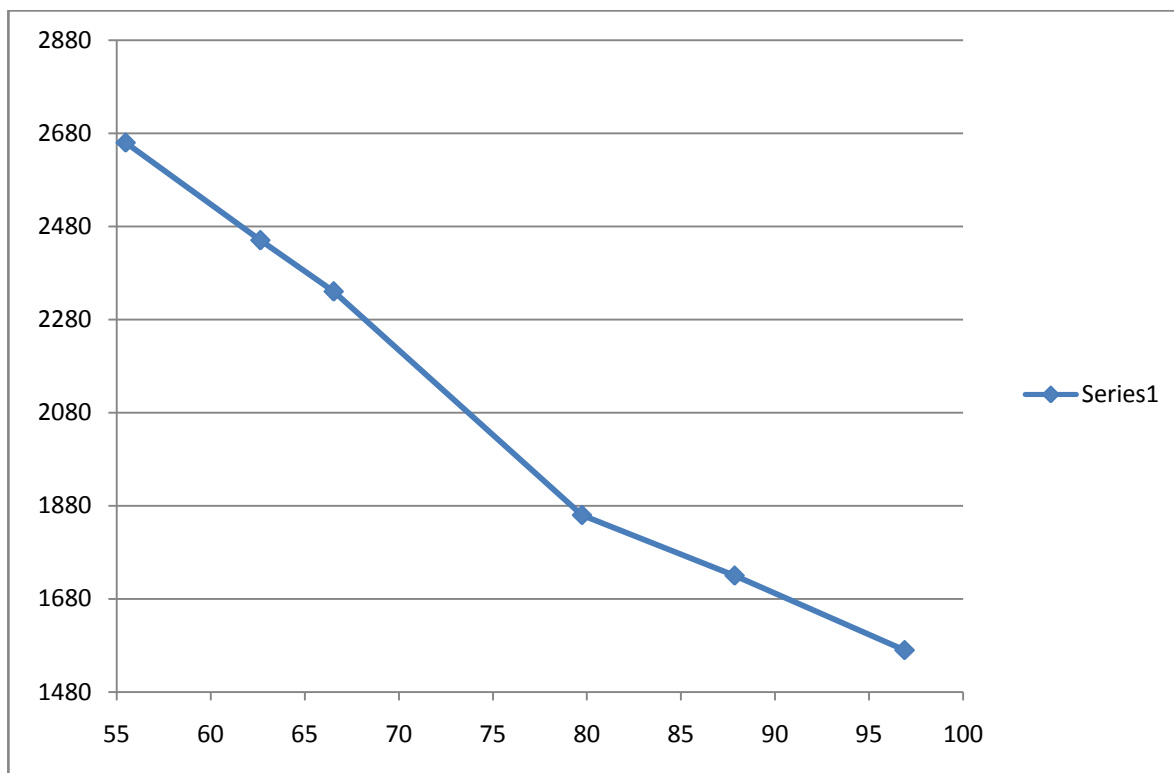
MARTÍN VIDE, Juan Pedro. Ingeniería de ríos. México, D.F.: Editorial Alfaomega, 2003.

SUÁREZ DÍAZ, Jaime. Control de erosión en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. Librería UIS 2001.

TAMAYO Y TAMAYO, Mario. El proceso de la investigación científica. México, D.F.: Limusa, 1995.

Anexo 1.

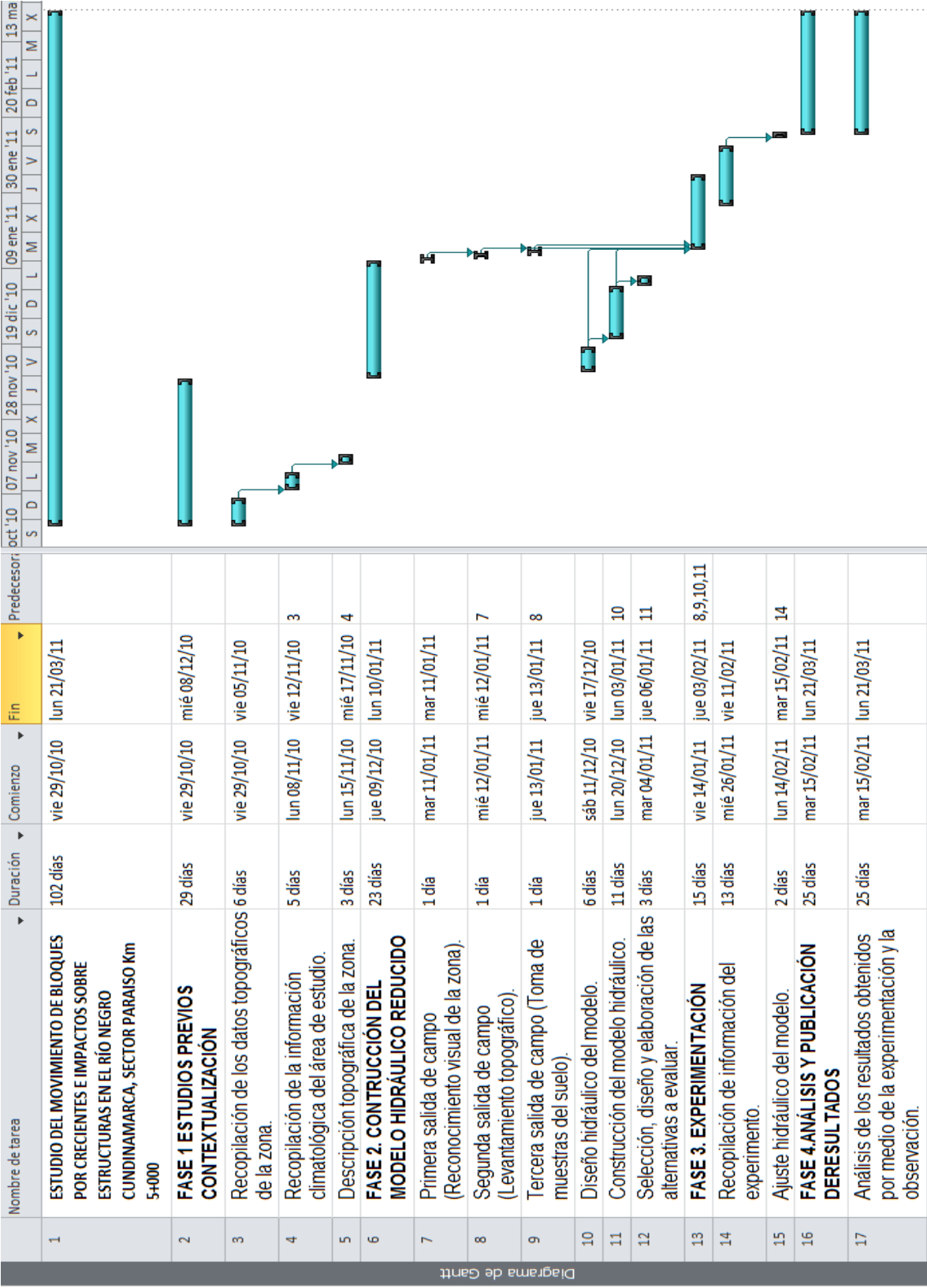
CURVA HIPSOMÉTRICA DEL ÁREA DE ESTUDIO



Anexo 2.

**MAPA DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA CON EL ÁREA DE
ESTUDIO**

Anexo 3.
CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES



Anexo 4.
COSTOS DE LA INVESTIGACIÓN

RECURSOS MATERIALES

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Memoria USB 2GB	UN	1	70.000	70.000
Caja de Cd	UN	1	1.000	5.000
Resma papel carta	UN	2	10.000	20.000
Cartuchos de tinta Negra	UN	2	28.000	56.000
Cartuchos de tinta Color	UN	1	45.000	45.000
Transportes	UN	100	1.300	130.000
Fotocopias	UN	1000	50	10.000
Calculadora	UN	1	50.000	50.000
Esferos	UN	6	600	3.600
Portaminas	UN	3	1.500	4.500
Tubo de Minas	UN	4	1.000	4.000
Llamadas telefónicas	Minutos	1.000	200	200.000
Modelo Físico Reducido	UN	1	200.000	200.000
TOTAL				\$ 798.100

RECURSOS TECNOLÓGICOS

CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (\$)	VALOR TOTAL (\$)
Computador	Und	1	1'900.000	400.000
Impresora	Und	1	250.000	50.000
Internet	Mes	4	30.000	120.000
Impresiones	Hojas	1000	250	250.000
Laboratorio materiales	Hora	30	20.000	600.000
TOTAL				\$ 1'420.000

RECURSOS HUMANOS

CARGO		No. HORAS POR SEMANA	No. DÍAS	TOTAL HORAS	VALOR HORA (\$)	VALOR TOTAL(\$)
Investigadores	Investigadores principales	8	80	640	-----	-----
Director temático	Coinvestigadores*	1		32		138.000
Asesora metodológica		2	16	64		148.148
TOTAL						\$ 286.148

* Valor asumido por la Universidad de La Sallé, según acuerdo 157 de diciembre de 2008.

Anexo 5.

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA ZONA

I D E A M - INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES															
VALORES MEDIOS MENSUALES DE NIVELES (Cms)															
FECHA DE PROCESO				08/09/2010				ESTACION 2E+06 TOBIA							
LATITUD	507	N	TIPO ESTACION	LG			DEPTO	CUNDINAMARCA	FECHA-INSTALACION		1974-AGO				
LONGITUD	7426	W	ENTIDAD	1	IDEAM		MUNICIPIO NIMAIMA		FECHA-SUSPENSION						
ELEVACION	620	m,s,n,m	REGIONAL	11	BOGOTA		CORRIENTE NEGRO								
.....
AÑO	EST	ENT	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	VR ANUAL
.....
1990	1	1	109	118	122	153	157	107	95	83	84	132	148	150	122
1991	1	1	124	124	162	166	164	121	100	86	87	106	142	140	127
1992	1	1	117	117	94	118	119	103	79	76	85	95	114	128	104
1993	1	1	127	125	129	148	153	107	85	74	90	101	164	149	121
1994	1	1	135	141	169	185	156	113	99	78	76	117	165	134	131
1995	1	1	100	86	114	154	154	136	103	109	104	143	172	169	129
1996	1	1	136	123	181	153	142	130	112	93	95	137	126	123	129
1997	1	1	122	140	131	140	105	126	91	84	100	114	125	113	116
1998	1	1	110	109	135	141	149	111	73	81	80	121	152	128	116
1999	2	1	148	177	165	161	137	122	105	90	107	171	163	184	144
2000	1	1	104	123	157	162	139	143	120	97	107	*	121	103	125
2001	1	1	121	98	130	116	132	115	91	90	111	118	146	164	119
2002	1	1	110	103	129	181	136	121	89	80	87	97	113	124	114
2003	1	1	91	97	109	154	115	113	93	92	92	131	172	143	117
2004	1	1	134	102	112	*	156	108	97	92	88	120	179	139	121
2005	1	1	113	145	138	139	198	126	92	93	70	158	169	120	130
2006	1	1	116	115	163	182	197	153	100	83	83	104	168	164	136
2007	1	1	121	100	135	209	123	111	104	100	87	156	161	140	129
2009	1	1	117	136	155	147	115	86	64	60	63	74	95	90	100
MEDIO			119	120	138	156	145	119	94	86	89	122	147	137	123
MAXIM			148	177	181	209	198	153	120	109	111	171	179	184	209
MINIM			91	86	94	116	105	86	64	60	63	74	95	90	60
.....

Anexo 6.

LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA ZONA AFECTADA

Anexo 7.

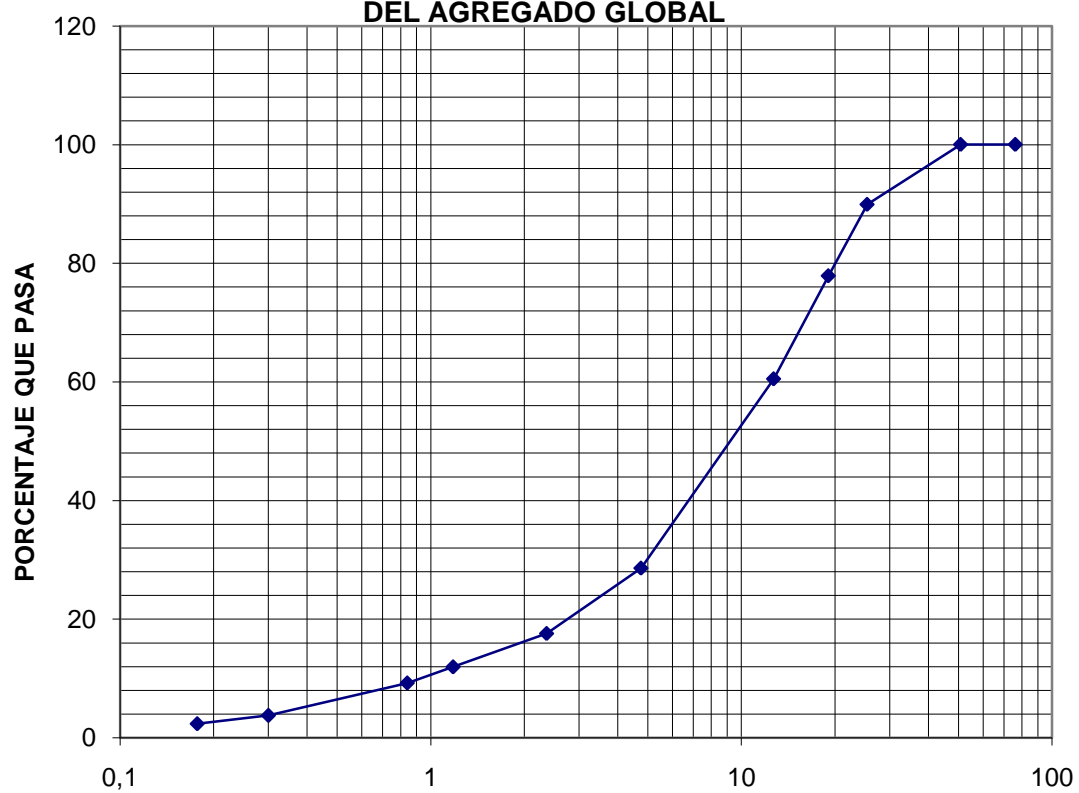
GRANULOMETRÍA DEL SECTOR DE ESTUDIO

PESO MUESTRA SECA SIN LAVAR (gr)	MUESTRA SECA DESPUÉS DE LAVAR (gr)	MUESTRA HÚMEDA + RECIPIENTE (gr)	MUESTRA SECA + RECIPIENTE (gr)	PESO RECIPIENTE (gr)	HUMEDAD NATURAL (%)
5499	5099	5990	5690	191	5,272408

Tamiz (mm)	Tamiz	(%) Retenido Grueso (gr)	(%) Retenido Fino (gr)	(%) Retenido total (gr)	Granulometría del agregado Global*		
					% Retenido Global	% Retenido acumulado	% que pasa
76,2	3"	0,00		0,00	0,00	0,00	100,00
50,8	2"	0,00		0,00	0,00	0,00	100,00
25,4	1"	514,50		514,50	10,11	10,11	89,89
19,05	3/4"	612,50		612,50	12,03	22,14	77,86
12,7	1/2"	884,50		884,50	17,38	39,51	60,49
4,75	Nº 4	0,00	1.624,50	1.624,50	31,91	71,43	28,57
2,36	Nº 8	0,00	561,00	561,00	11,02	82,45	17,55
1,18	Nº 16	0,00	286,50	286,50	5,63	88,08	11,92
0,84	Nº 20	0,00	138,00	138,00	2,71	90,79	9,21
0,3	Nº 50	0,00	278,50	278,50	5,47	96,26	3,74
0,177	Nº 80	0,00	71,50	71,50	1,40	97,66	2,34
0,074	Nº 200	0,00	119,00	119,00	2,34	100,00	0,00
FONDO	Platillo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
TOTAL	suma total	2.011,50	3.079,00	5.090,50	100,00		

* La granulometría se realizó en el laboratorio de suelos perteneciente a la universidad de la Salle.

ANALISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GLOBAL



Anexo 8.

CD REGISTRO FOTOGRÁFICO Y VIDEOS